



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA

TESIS
(Licenciatura en Geografía)

**DETERMINACIÓN TAXONÓMICA Y
DIVERSIDAD DEL PAISAJE
EN KARST TROPICAL:
PARQUE ESTATAL DE LA SIERRA DE TABASCO,
MUNICIPIOS DE TEAPA Y TACOTALPA,
TABASCO, MÉXICO**

Egresado:

Sven Jesús Alberto Peña Ramírez

Asesor:

M. en C. José Santos Morales Hernández





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE DE CONTENIDO

| | |
|---|-----|
| i. DEDICATORIAS | 4 |
| ii. AGRADECIMIENTOS | 5 |
| 1. RESUMEN | 6 |
| 2. ANTECEDENTES | 8 |
| 2.1 INTRODUCCIÓN | 8 |
| 2.2 PLANTEAMIENTO Y FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA..... | 10 |
| 2.3 MARCOS DE REFERENCIA (GENERALIDADES) | 14 |
| 2.3.1 MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL | 14 |
| 2.3.2 MARCO HISTÓRICO..... | 14 |
| 2.4 DELIMITACIÓN ESPACIO-TEMPORAL..... | 15 |
| 2.5 CARACTERIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO | 17 |
| 2.5.1 CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO NATURAL..... | 17 |
| 2.5.2 CARACTERÍSTICAS SOCIOECONÓMICAS Y CULTURALES | 42 |
| 2.5.3 IMPACTO AMBIENTAL Y CONSERVACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES..... | 47 |
| 2.6 HIPÓTESIS | 51 |
| 2.7 OBJETIVOS..... | 51 |
| 2.7.1 OBJETIVO GENERAL | 51 |
| 2.7.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 51 |
| 3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN | 52 |
| 3.1 MATERIAL Y MÉTODO | 52 |
| 3.1.1 MATERIAL | 52 |
| 3.1.2 MÉTODO (GENERALIDADES) | 53 |
| 3.2 GEOMORFOLOGÍA GENERAL Y REGIONAL DEL KARST EN EL PARQUE ESTATAL DE LA SIERRA DE TABASCO..... | 54 |
| 3.2.1 GEOMORFOLOGÍA GENERAL DEL KARST | 54 |
| 3.2.2 GEOMORFOLOGÍA REGIONAL DEL KARST EN EL PARQUE ESTATAL DE LA SIERRA DE TABASCO | 77 |
| 3.3 GEOMORFOLOGÍA DEL KARST EN EL PARQUE ESTATAL DE LA SIERRA DE TABASCO | 80 |
| 3.3.1 GEOMORFOLOGÍA Y TAXONOMÍA DEL KARST TROPICAL | 80 |
| 3.3.2 ESTUDIOS PRECEDENTES | 134 |
| 3.3.3 EXTRACCIÓN Y ANÁLISIS DE LINEAMIENTOS | 143 |
| 3.3.4 MORFOMETRÍA Y ANÁLISIS DE DEPRESIONES KÁRSTICAS..... | 175 |
| 3.3.5 MORFOMETRÍA Y ANÁLISIS DE COLINAS KÁRSTICAS RESIDUALES | 185 |
| 3.3.6 MUESTREO Y VERIFICACIÓN DE CAMPO..... | 200 |
| 3.3.7 ANÁLISIS DE LABORATORIO | 208 |
| 4. RESULTADOS..... | 215 |
| 4.1 CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA Y DETERMINACIÓN TAXONÓMICA DEL PAISAJE KÁRSTICO EN EL PARQUE ESTATAL DE LA SIERRA DE TABASCO | 215 |



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.2 | MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE LOS TIPOS Y SUBTIPOS DE PAISAJE KÁRSTICO EN EL PARQUE ESTATAL DE LA SIERRA DE TABASCO..... | 274 |
| 4.3 | COMPOSICIÓN DEL PAISAJE KÁRSTICO EN EL PARQUE ESTATAL DE LA SIERRA DE TABASCO | 276 |
| 4.3.1 | ECOLOGÍA DEL PAISAJE, GEODIVERSIDAD Y CONSERVACIÓN..... | 276 |
| 4.3.2 | ESTABLECIMIENTO, FUNDAMENTACIÓN Y SELECCIÓN DE UNIDADES, ESCALAS Y MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA GEODIVERSIDAD Y VALORES ASOCIADOS..... | 284 |
| 4.3.3 | PROPIEDADES EMERGENTES Y VALORES DE LA GEODIVERSIDAD DEL PAISAJE KÁRSTICO EN EL PARQUE ESTATAL DE LA SIERRA DE TABASCO..... | 294 |
| 4.4 | ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 321 |
| 5. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 323 |
| 5.1 | CONCLUSIONES..... | 323 |
| 5.2 | RECOMENDACIONES | 325 |
| 5.2.1 | PROGRAMAS DE GEOCONSERVACIÓN..... | 325 |
| 5.2.2 | FIGURAS DE GEOCONSERVACIÓN..... | 325 |
| 6. | APÉNDICES | 329 |
| 7. | REFERENCIAS | 358 |
| 8. | ÍNDICE DE CONTENIDOS | 368 |
| 9. | ÍNDICE DE FIGURAS..... | 372 |
| 10. | ÍNDICE DE TABLAS..... | 377 |
| 11. | ÍNDICE DE MAPAS..... | 379 |

MUY IMPORTANTE:

Reservados todos los derechos del autor de la obra
Derechos protegidos en el Registro Público del Derecho de Autor
SEP-INDAUTOR
03-2012-073113351000-01

i. DEDICATORIAS

A la naturaleza que en infinitas formas muestra su dominio y bondad, ella que en grutas, platanares y demás maravillas expone su adveración, su legado de millones de años de evolución.

A los seres bondadosos que me apoyaron incondicionalmente confiando en mí y en ésta investigación.



Fotografía anónima

*Un lugar donde las montañas enseñorean en el horizonte
donde la naturaleza se desgrana en una sinfonía verde
donde murmura el agua cristalina de los ríos y arroyos*
Rocío Domínguez



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ii. AGRADECIMIENTOS

A mis compañeros en esta senda de trabajo, esfuerzo y compromiso Vaquita, Nonito, Nikona y Tuga.

A mi Familia por su apoyo, amor y orientación.

A mis Amigos por su ánimo, comprensión, apoyo moral y académico, en especial a Alejandro Pérez, Alfonso, Luis, José Merino y Armando González.

Al referente teórico de la Geomorfología Kárstica, Ecología, Biogeografía y Geoconservación, en especial a Eko Haryono, Mick Day, Derek Ford, Paul Williams, Anwar Abdullah y Alfonso Calvo.

A mi Asesor de Tesis M. en C. José Santos Morales Hernández por sus enseñanzas, consejos, revisiones, comprensión y confianza.

A mis Sinodales: Lic. María Teresa López Castro, Mtro. Gilberto Núñez Rodríguez, Lic. Alberto Pérez Rojas y M. en C. Alberto Javier Reyes García, por sus observaciones y revisiones.

Al Instituto Nacional de Estadística y Geografía por la información proporcionada, en especial a María Campos.

A la Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental del Estado de Tabasco y al Equipo encargado y asociado al Monumento Natural Gruta del Cerro Coconá, por su apoyo institucional, práctico y orientativo, en especial a la Ocean. Silvia Whizar Lugo, Biól. Perfecto Alcudia García, Benigno Domínguez, Jaime Valente, Armando González, Carlos Esquivel y Saúl Herrera.

Al Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M, por su apoyo institucional, práctico y orientativo, en especial al Dr. Adalberto Noyola Robles, Dr. David Muriá Vila, Ing. Abraham Sánchez Ramírez, Téc. Admvo. Agustín Muñoz Villegas y Bec. Navani Cadena.

Al Dr. Pedro García, Coordinador de la Unidad de Enseñanza de Biología de la Facultad de Ciencias, U.N.A.M., por su especial apoyo y supervisión en la determinación del material fósil.

A los servicios bibliotecarios proporcionados por:

- Universidad Nacional Autónoma de México: Instituto de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Facultad de Ciencias, Biblioteca Central.
- Universidad Autónoma Metropolitana, Campus Xochimilco
- Universidad Veracruzana, Campus Mocambo
- Biblioteca Vasconcelos, Cd. de México, Secretaría de Educación Pública
- Biblioteca José Ma. Pino Suárez, Villahermosa, Gobierno del Estado de Tabasco

A mis Profesores de Carreras por su relevante participación en mi formación académica, en especial al M. en C. José Santos Morales, Dr. Juan Carlos Gómez, Dra. Tobyanne Berenberg, Dr. Jorge Caire, Lic. José Balanzario, Dra. Laura Maderey, Mtro. Arturo Sánchez, M. en Geog. Gilberto Núñez, Lic. María Teresa López, Lic. Marcos Palemón Hernández, Dra. Teresa Ayllón, Dr. José Lugo, M. en C. Roxana Acosta, Biól. Rogelio Frago, M. en C. Sergio Yussim, M. en C. Alberto Reyes, M. en C. Angélica Ramírez, Dr. Víctor López, Dr. Álvaro Chaos, M. en C. María Teresa Hernández, Dr. Héctor Benavides, Biól. Lev Jardon, Dr. Jesús Ramírez, Dra. Hortensia Parra, Dra. Ibeth Oviedo, Lic. Saúl Arce, Dr. José Hernández, Lic. Miriam Carrillo, y Verónica Ramírez.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

1. RESUMEN

Es sabido que en las últimas décadas, el uso descontrolado de los recursos naturales ha llevado el deterioro ambiental a niveles críticos, traduciéndose en el desmembramiento paulatino y en ocasiones acelerado de los ecosistemas. Ello ha sido causa de la reciente proliferación de áreas naturales protegidas alrededor del mundo, las cuales se han ido especializando, tanto en programa como en figura, para la protección, conservación y uso sustentable de la naturaleza a diferentes niveles, e.g. Área Natural Estricta, Parque Nacional, Geoparque, etc. Los paisajes kársticos tropicales, como plataformas de ecosistemas complejos e interacciones hombre-naturaleza de gran valor cultural, son motivo de protección, particularmente desde la perspectiva de la bioconservación y desarrollo sustentable. Recientemente, las investigaciones especializadas en karst tropical y su uso sustentable, así como el surgimiento de programas y figuras específicas de geoconservación a nivel internacional (UNESCO), han derivado en el establecimiento de exitosas ANPs especializadas en la conservación y uso sustentable del karst y recursos naturales asociados.

Por tales motivos, y con base en la escasa representatividad específica del patrimonio nacional de paisajes y cuevas kársticas, la falta de estudios nacionales especializados en karst tropical bajo el paradigma realmente global de la geomorfología kárstica, la notable riqueza y diversidad de paisajes y colinas kársticas residuales expuestas en el Parque Estatal de la Sierra de Tabasco (PEST) y área de influencia, sumado a la conciencia ambiental de la comunidad tabasqueña; la presente investigación se encausó como fin último a la determinación taxonómica y evaluación de la composición del paisaje kárstico en cuestión, lo que permitió por un lado, estimar su diversidad de procesos y paisajes geomorfológicos, y valores de geodiversidad; y por otro, identificar las áreas prioritarias de conservación kárstica. Todo ello posibilitó a su vez el reconocimiento de los programas y figuras óptimas para la protección, conservación y uso sustentable del karst y recursos naturales asociados del PEST y área de influencia, para el beneficio mutuo de la naturaleza y sociedad, y en particular de la comunidad tabasqueña.

La presente investigación implicó, entre lo más destacado, la caracterización geográfica, diferenciación y caracterización geomorfológica (génesis, evolución y morfología) del paisaje kárstico a partir de la investigación documental, análisis (estadístico, gráfico (extracción automática de lineamientos), de caracteres espaciales y morfométricos) conjunto de lineamientos, depresiones kársticas y colinas kársticas residuales (sobre la plataforma digital del software ArcGIS 10 y paquetes geomáticos y estadísticos relacionados, el modelo digital de elevación LIDAR y ortofotos digitales, ambos de alta resolución espacial), y muestreo, verificación y observación controlada del paisaje kárstico, sumado a los análisis de laboratorio correspondientes; la selección y estandarización del sistema de clasificación del paisaje kárstico tropical y colinas kársticas residuales con base en la comprensión, crítica y discusión profunda de la teoría Geomorfológica-Kárstica; la estandarización y establecimiento de la nueva teoría de la geodiversidad compatible con la teoría de la biodiversidad y bioconservación, y aplicable exclusivamente a los programas y figuras de geoconservación, todo ello a partir de la comprensión, crítica y discusión profunda de la teoría de la Geografía Ambiental y Ecología de Paisaje, así como de los avances en investigación y aplicación de la geodiversidad.

En este estudio detallado del área kárstica del PEST y su zona de influencia, se distinguieron 4 géneros de paisaje kárstico: *Karst laberíntico*, *Karst poligonal*, *Fluviokarst activo* y *Karst residual*, distribuidos en 19 patrones de lineamientos; y 4 tipos de colinas kársticas residuales (Cúpula, Cono, Mogote y Torre) con distribución variable. También es evidente el papel que juega la heterogeneidad litológica, estructural y evolutiva en el modelado del paisaje kárstico, donde el relieve de mayor pendiente y altitud se desarrolla en las calizas con estratificación masiva y de mayor dureza, y los patrones de lineamientos paralelos, entrecruzados, dendríticos y aislados i.e. karsts laberínticos, poligonales, fluviales y residuales; están controlados por la dominancia proceso-geomorfológica de la erosión lineal, disolución generalizada, erosión fluvial y



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

aplanamiento por corrosión, respectivamente. El control geológico del paisaje kárstico en el PEST también es corroborado por la orientación preferente de los lineamientos de valle NE-SW y NW-SE, congruente con los desplazamientos laterales izquierdos asociados al sistema Polochic-Motahua de edad Mioceno-Plioceno, y con las cabalgaduras, anticlinales y sinclinales del Cretácico tardío. La alta geodiversidad genotípica sistémica alfa, genotípica sistémica gamma, y funcional alfa de paisajes geomorfológicos evaluada, demuestran genética, evolutiva y morfológicamente la gran importancia que, como patrimonio geológico mundial, tiene el paisaje kárstico del PEST. La rareza de los karsts residuales de la región, puesta en evidencia por su bajo valor de importancia, así como por la mediana geodiversidad genotípica sistémica beta de paisajes geomorfológicos, junto con la mediana geodiversidad fenotípica morfológica alfa (de colinas kársticas residuales) del *Karst residual* Poaná, permitieron identificar y orientar las áreas prioritarias de conservación kárstica en el PEST, consideradas a su vez candidatas idóneas de reconocimiento internacional como Patrimonio Mundial de Paisajes y Cuevas Kársticas (UNESCO), y áreas aptas para su establecimiento como Monumento Natural, y con ciertas reservas, como Geoparque. La considerable magnitud de los valores de la geodiversidad del paisaje kárstico en el PEST, y su alta potencialidad, describen desde la perspectiva natural y social la sólida base geográfica del PEST, para la exitosa conservación y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales propios del karst tropical.

2. ANTECEDENTES

2.1 INTRODUCCIÓN

La *Geografía*, según Emmanuel de Martonne, es la ciencia que estudia la distribución, en la superficie del globo terráqueo, de los hechos y fenómenos físicos, biológicos y humanos, las causas de ésta distribución y las relaciones locales de éstos fenómenos (Matthews, y otros, 2008). Con base en esta concepción se derivan los principios metodológicos de la Geografía moderna:

- Causalidad: investiga las causas que producen un fenómeno geográfico determinado.
- Distribución o extensión: localiza la magnitud en tiempo y espacio de los hechos y fenómenos geográficos.
- Relación: busca los vínculos existentes entre los hechos y fenómenos geográficos singulares y análogos.
- Evolución: estudia la transformación que sufren los hechos y fenómenos geográficos a través del tiempo.

Adicionalmente, la Geografía Contemporánea, en general, considera tres conceptos centrales en su disciplina, el espacio, el lugar y el ambiente. Siendo esencia de la Geografía, la integración de las variaciones espaciales sobre la superficie terrestre con la singularidad de los lugares y las interacciones entre la sociedad y su ambiente (Matthews, y otros, 2008).

Debido a que los hechos y fenómenos geográficos tienen una identidad espacio-temporal definida, y su existencia es producto de su evolución e interrelaciones, su estudio, demanda una especialización temática y una integración de causalidad. La especialización, que dirige el estudio en un sentido lo más cercano a la realidad, auxiliado por ciencias afines a la Geografía, y la integración de todos los actores que participan en la existencia de cada hecho y fenómeno geográfico con el fin de entender sus interrelaciones.

En respuesta a esto, la Geografía contemporánea ha mostrado una fuerte tendencia a la diversificación y especialización. Herbert D. T. afirma que la Geografía es el estudio de la superficie de la Tierra, la cual implica los fenómenos y procesos naturales de la Tierra, ambientes humanos y paisajes a escala local y global, y se divide básicamente entre Geografía Física, la cual es sin ambigüedad una ciencia que analiza las características físicas de la superficie terrestre, y Geografía Humana, la cual se centra en la ocupación humana sobre la Tierra (Matthews, y otros, 2008).

En general, la Geografía se divide de la siguiente manera:

- Geografía Física o Geografía Ambiental.
- Geografía Humana o Geografía del espacio construido.

De la Geografía Física o Ambiental se derivan la Geografía astronómica, Geografía matemática, Geomorfología, Climatología, Hidrografía, Geografía de los suelos y Biogeografía. De la Geografía Humana se deriva su homónima, la geografía de la población, Geografía social, Geografía rural, Geografía urbana, Geografía industrial, Geografía económica y Geografía política.

Bajo la concepción de la Geografía regional y en sentido filosófico y de identidad, la Geografía como ciencia mixta, física y social, está al servicio del desarrollo humano en equilibrio con la naturaleza (Capel, y otros, 1982). El quehacer geográfico debe ser resultado de una dialéctica que integre la praxis de las ciencias exactas y sociales, en el que el trabajo multidisciplinario es evidente.

Dentro de ese gran abanico de temáticas que abarca el quehacer geográfico, se encuentra una muy especial, que aqueja a toda la humanidad sin excepción, el deterioro ambiental. La agresiva transformación a la que se ha visto sometido el planeta por parte de la sociedad humana



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

en los últimos años, ha modificado en mayor o menor medida los ciclos evolutivos normales de las entidades vivas e inertes. Esto se ha hecho evidente en la aceleración del ciclo hidrológico global y en la pérdida de biodiversidad, entre muchos otros fenómenos. De ahí que surja un interés primordial por reducir las alteraciones al equilibrio ecológico y por consiguiente la conservación de los recursos naturales. Entendiendo por *conservación*, la utilización racional de los recursos naturales, que involucra el mantenimiento de poblaciones animales y vegetales viables, en intervalos de tiempo ecológico (Arriaga Cabrera, y otros, 2000), y *conservación ambiental* como el uso del ambiente para sustentar de la mejor manera posible a la biodiversidad, la cual asegura las bases físicas para la continuidad vital de la humanidad (Dasmann, 1984).

Es precisamente de esta temática, de la que parte la presente investigación la cual contempla un estudio geomorfológico, paisajístico-ecológico y social-conservacionista. En concreto, este estudio se enfoca en la conservación del recurso natural (karst tropical) en sentido paisajístico, como herencia mundial única, producto de la evolución geológica y sustentante de una sinergia ecológica invaluable.

2.2 PLANTEAMIENTO Y FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

¿Por qué conservar el medio abiótico?

La conservación de los distintos *paisajes físico-geográficos*¹ y sus componentes intrínsecos (bióticos y abióticos) son en la actualidad temas de alta prioridad en las agendas gubernamentales, líneas de investigación científica y, por supuesto, en el quehacer geográfico. El valor natural que poseen los diferentes paisajes terrestres, alrededor del mundo, cobra mayor importancia cuando éstos son concentraciones de una gran diversidad biológica y geológica. En este sentido, es indiscutible la importancia del medio abiótico en el establecimiento y desarrollo de los fenómenos biológicos².

¿Que son los paisajes kársticos?

De la interacción de los elementos geológicos surgen los paisajes, y de entre ellos, en *medios naturales tropicales*³ y *subtropicales*⁴, se encuentran los *paisajes kársticos*⁵, que en general, son porciones de la superficie terrestre donde tiene un amplio desarrollo el proceso erosivo en rocas calcáreas, evaporíticas y aun areniscas. En las regiones tropicales y subtropicales son características las formas residuales del relieve con aspecto de domos, conos y torres, y rocas desnudas, así como los suelos residuales resultado de la disolución de los carbonatos y la permanencia de otros componentes de la roca (Lugo Hubp, 1989).

El paisaje kárstico tropical: diversidad, conservación y desarrollo.

Los paisajes kársticos tropicales, en función de su génesis, evolución y contexto biótico y abiótico, pueden presentar una amplia variabilidad en cuanto a la morfología del relieve (forma y composición paisajística), e.g. karst poligonal, laberíntico o residual, de cúpulas, cónico o de torre (Ford, y otros, 2007). La diversidad de los paisajes kársticos, existente en cada sitio, así como su valor científico, escénico, tradicional y cultural (entre otras características), son razones de peso para gestionar medidas de conservación que promuevan en ambos sentidos, la protección del patrimonio natural y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales asociados, abriendo las posibilidades a formas alternativas de *desarrollo sustentable*⁶ (i.e. ecoturismo, turismo alternativo, turismo de aventura, introducción de técnicas de ingeniería agroforestal, programas de educación ambiental y participación comunitaria).

Debido a la peculiaridad geomorfológica de estos paisajes, la gran cantidad de recursos naturales que poseen (acuíferos, suelo, biodiversidad y actividades ecoturísticas potenciales), a su evidente actuar como concentraciones de ecosistemas complejos y, en muchas ocasiones, de endemismos bióticos, así como los valores sociales y culturales asociados, éstos son considerados áreas prioritarias de conservación. En relación a esto, la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, por sus siglas en inglés), a través de la Comisión Mundial de Áreas Protegidas (WCPA, por sus siglas en inglés) sugiere pautas generales a considerar en la conservación del karst (International Union for Conservation of Nature. World Commission on

¹ Unidad físico-geográfica principal de la división (regionalización) de un territorio con un mismo tipo de relieve, estructura geológica, clima, carácter general de la superficie y aguas subterráneas, con conjugaciones secuenciales de suelos, vegetación y fauna (Lugo Hubp, 1989).

² Que incluye los humanos.

³ Son aquellas zonas geográficas situadas a uno y otro lado del Ecuador que asocian calor y humedad, permanente o estacional (Universidad Jaime, 2001).

⁴ Perteneciente o relativo a las zonas templadas adyacentes a los trópicos, caracterizadas por un clima cálido con lluvias estacionales (Real Academia Española, 2011).

⁵ El karst se refiere a los procesos y formas del relieve terrestre asociados con la disolución de roca caliza. El relieve kárstico y sus paisajes son producto de un conjunto complejo de procesos geomorfológicos, condiciones y litología. El agua es determinante en el desarrollo de los paisajes kársticos (Oxford University Press, 2010).

⁶ Desarrollo que resuelve las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para atender sus propias necesidades (Instituto Nacional de Ecología, 2001).

Protected Areas, 1997). Entre éstas se menciona que “Áreas o sitios con un alto valor natural, social o cultural, que posean una amplia gama de valores en un solo sitio, que han sufrido una mínima degradación ambiental, como también de un tipo aún no representado en el sistema de áreas protegidas del país deberían tener la prioridad en la protección” y que “los administradores de áreas kársticas y de cuevas aisladas deben reconocer que estos paisajes son complejos sistemas naturales tridimensionales integrados por roca, agua, suelo, vegetación y elementos atmosféricos”.

Contexto de las Áreas Naturales Protegidas y la conservación del Karst.

En el marco de las Áreas Naturales Protegidas⁷ (ANPs) y bajo la categoría existente para su conservación (International Union for Conservation of Nature, 2008), el relieve kárstico corresponde principalmente a la categoría III: Monumento o Característica Natural⁸. Sin embargo, se debe considerar su probable incorporación en otras categorías, de acuerdo con la biodiversidad asociada al sitio, al valor escénico y cultural, y al uso local de los recursos naturales. En el contexto de la Convención del Patrimonio Mundial (World Heritage Convention) de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), los paisajes kársticos se encuentran bien representados, donde un gran número de sitios geográficos con relieve kárstico poseen ya el reconocimiento internacional de Patrimonio Mundial (International Union for Conservation of Nature. World Heritage Convention, 2008). Al respecto, se consideran candidatos potenciales a obtener dicho reconocimiento los siguientes sitios:

- a) Paisajes que son formados por la acción principal de procesos kársticos por encima y por debajo del suelo y,
- b) Paisajes kársticos y cuevas con importancia excepcional y universal en relación con las Ciencias de la Tierra, asumiendo su accesibilidad y comprensión por parte de la sociedad civil.

El Karst de Tabasco y su conservación.

En México, el *karst tropical* se encuentra distribuido de manera discontinua a través de la Sierra Madre Oriental, desde el extremo suroeste del estado de Tamaulipas, atravesando Veracruz y hasta la porción noreste de Oaxaca. Otro importante conjunto de karst tropical se encuentra al sureste del estado de Veracruz, sur de Tabasco y centro-norte de Chiapas (Lugo Hubp, y otros, 1992) (**Figura 1**). Actualmente existen paisajes kársticos tropicales considerados dentro de ANPs a nivel nacional; ejemplo de ello son la Reserva de la Biósfera “Selva El Ocote” en el estado de Chiapas y el Área de Protección de Flora y Fauna “Cañón del Usumacinta” en el estado de Tabasco (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2010).

En el estado de Tabasco, el karst tropical está representado en su extremo sur, en los Municipios de Teapa, Tacotalpa y Tenosique (Lugo Hubp, y otros, 1992). El Área Natural Protegida “Parque Estatal de la Sierra de Tabasco” (PEST), situada en los Municipios de Teapa y Tacotalpa, comprende en su mayoría relieves kársticos de tipo tropical (Gobierno del Estado de Tabasco. Secretaría de Planeación, 2009). Esta ANP tiene como principal objetivo la conservación del patrimonio ecológico, genético, biológico, hidrológico y escénico (México Desconocido, 2010), aunque la conservación del karst tropical se encuentra considerada dentro de esta ANP, la evaluación específica de estas formaciones puede aportar mayor conocimiento acerca de su tipología, y en consecuencia de su valor escénico y manejo adecuado dentro del ecosistema.

⁷ Un *Área Natural Protegida* es un espacio geográfico claramente definido, reconocido, destinado y administrado, a través de medios legales o de otro tipo, para lograr, a largo plazo, la conservación de la naturaleza con los servicios ecosistémicos y valores culturales asociados (International Union for Conservation of Nature, 2008).

⁸ Según la IUCN, la Categoría III de Áreas Protegidas puede incluir: Características Naturales, Geológicas o Geomorfológicas: como cascadas, acantilados, cráteres, cuevas, yacimientos fósiles, dunas de arena, formas rocosas, valles y características marinas como montes submarinos y formaciones de coral (International Union for Conservation of Nature, 2008).

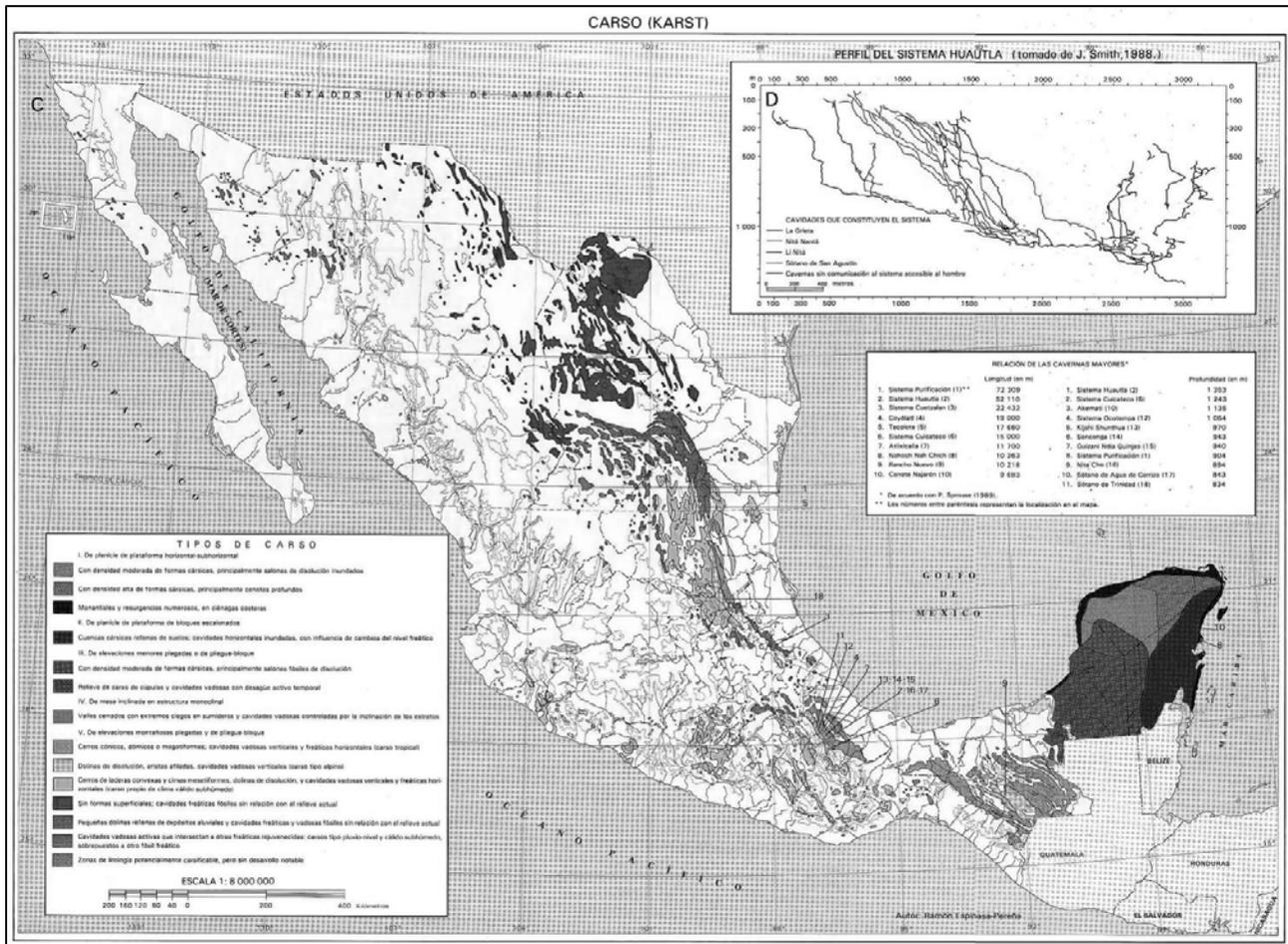


Figura 1. Distribución del karst en México (Lugo Hubp, y otros, 1992)

Aunque se ha reportado la existencia de tres tipos de relieve kárstico tropical: *kegelkarst*⁹, *kuppenkarst*¹⁰ y *turmkarst*¹¹ (Gerstenhauer, 1960) (McDonald, 2007), en la evaluación previa mediante percepción remota de la última Área Natural Protegida, se hizo evidente la existencia potencial de una alta variabilidad de paisajes kárstico tropicales dentro de un área relativamente pequeña. Esto, aunado al muy probable aprovechamiento sustentable del paisaje kárstico y a la conciencia ambiental de la comunidad local, ameritó la valoración del sitio desde un enfoque geomorfológico y paisajístico.

Por lo anterior, dicha área se sometió a una diferenciación geomorfológica y determinación taxonómica, que permitió evaluar la composición tipológica del paisaje kárstico tropical, en términos geomorfológicos, genéticos, evolutivos, de distribución geográfica, riqueza, abundancia y diversidad, entre otros. El trabajo consistió de tres etapas principales: caracterización geográfica (documental), caracterización geomorfológica y determinación taxonómica (documental, teórica y práctica), y evaluación de la composición tipológica del paisaje kárstico en el contexto de la ecología del paisaje (documental, teórica y práctica). Se propone que los resultados de esta investigación, aporten las razones necesarias para gestionar el establecimiento de una nueva Área Natural Protegida dentro del Parque Estatal de la Sierra de Tabasco y/o la valoración específica de este patrimonio natural dentro del PEST. Es importante señalar, como una recomendación prioritaria, que estos aportes y su aplicación en la gestión de ANPs, sean utilizados dentro de un

⁹ Karst de conos.
¹⁰ Karst de cúpulas.
¹¹ Karst de torres.

marco de desarrollo comunitario, a la sombra de planes de manejo que consideren los beneficios de la conservación específica del karst y el aprovechamiento sustentable de sus recursos naturales.

2.3 MARCOS DE REFERENCIA (GENERALIDADES)

Las características metodológicas del presente trabajo de investigación y el razonamiento deductivo implicado en su realización, demandaron la exposición de los diferentes marcos de referencia de manera parcial y secuencial, es decir, que la teoría precedió a la práctica en cada etapa de desarrollo de la investigación, y que en función de los resultados parciales estuvo orientada la teoría de la siguiente etapa.

Es importante no confundir el método abordado en este trabajo con una adecuación teórica *ad hoc*¹² que pretende alterar deliberadamente los resultados para confirmar una hipótesis, por el contrario, los resultados parciales de cada etapa (e.g. caracterización geográfica, geomorfológica, determinación taxonómica y composición tipológica) fueron sometidos a un análisis teórico-práctico que en función de los paradigmas *contemporáneos* de la Geografía, Geomorfología, Karstología, y Ecología (relacionados directa o indirectamente con el objeto de estudio), y en su caso, la construcción de nuevas teorías (en aquellas disciplinas científicas donde es inexistente un consenso teórico internacional, o bien se tiene un desarrollo incipiente de la base teórica), tuvo el propósito de optimizar los métodos tradicionales, y donde fue necesario, establecer una nueva base teórica-metodológica para la evaluación e interpretación del paisaje geográfico.

2.3.1 MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL

La presente investigación se centra en el campo de la *Geomorfología Kárstica, Ecología del Paisaje y Conservación de los Recursos Naturales*.

2.3.2 MARCO HISTÓRICO

Se pretendió realizar una evaluación lo más actual del área. El trabajo de gabinete partió de la consulta y análisis de la teoría especializada más reciente, así como de los trabajos precedentes de investigación relacionados directa o indirectamente con el área de estudio. El trabajo práctico de gabinete y laboratorio se sustentó en el software y material lo más reciente y accesible posible. El trabajo de campo se realizó en el mes de Junio del año 2011.

¹² Para referirse a lo que se dice o hace solo para un fin determinado (Real Academia Española, 2011).

2.4 DELIMITACIÓN ESPACIO-TEMPORAL

El *Parque Estatal de la Sierra de Tabasco* fue decretado el 24 de febrero de 1988¹³ (García Gómez, 2005) bajo la categoría de Reserva Ecológica. Esta ANP fue decretada con el fin de que se preserven y foresten ecosistemas representativos del patrimonio natural del país, y promover su uso racional y adecuado aprovechamiento en las actividades de esparcimiento, educación e investigación. Se considera a su vez que “la conservación de la cubierta vegetal de selva alta perennifolia hallada en el área de referencia, asegura la preservación de recursos acuíferos de alta calidad, además de evitar los desastrosos efectos de la erosión y la consecuente pérdida de suelos; siendo además, que las formaciones geomorfológicas que en ella se encuentran son únicas en su tipo en México, y dan al paisaje gran belleza escénica” (Vargas Márquez, y otros, 2002). Este Parque está conformado por dos polígonos correspondientes a la Sierra Madrigal y Sierras de Tapijulapa-Poaná, los cuales incluyen cinco zonas de manejo bajo jurisdicción estatal: Natural, de Recuperación, de Desarrollo Rural, de Uso Público y de Uso Especial. Simultáneamente a la creación de esta ANP se decretó el Monumento Natural “Gruta del Cerro Coconá”, el cual cuenta con 4.22 Km² ¹⁴ (Gobierno del Estado de Tabasco, 2007).

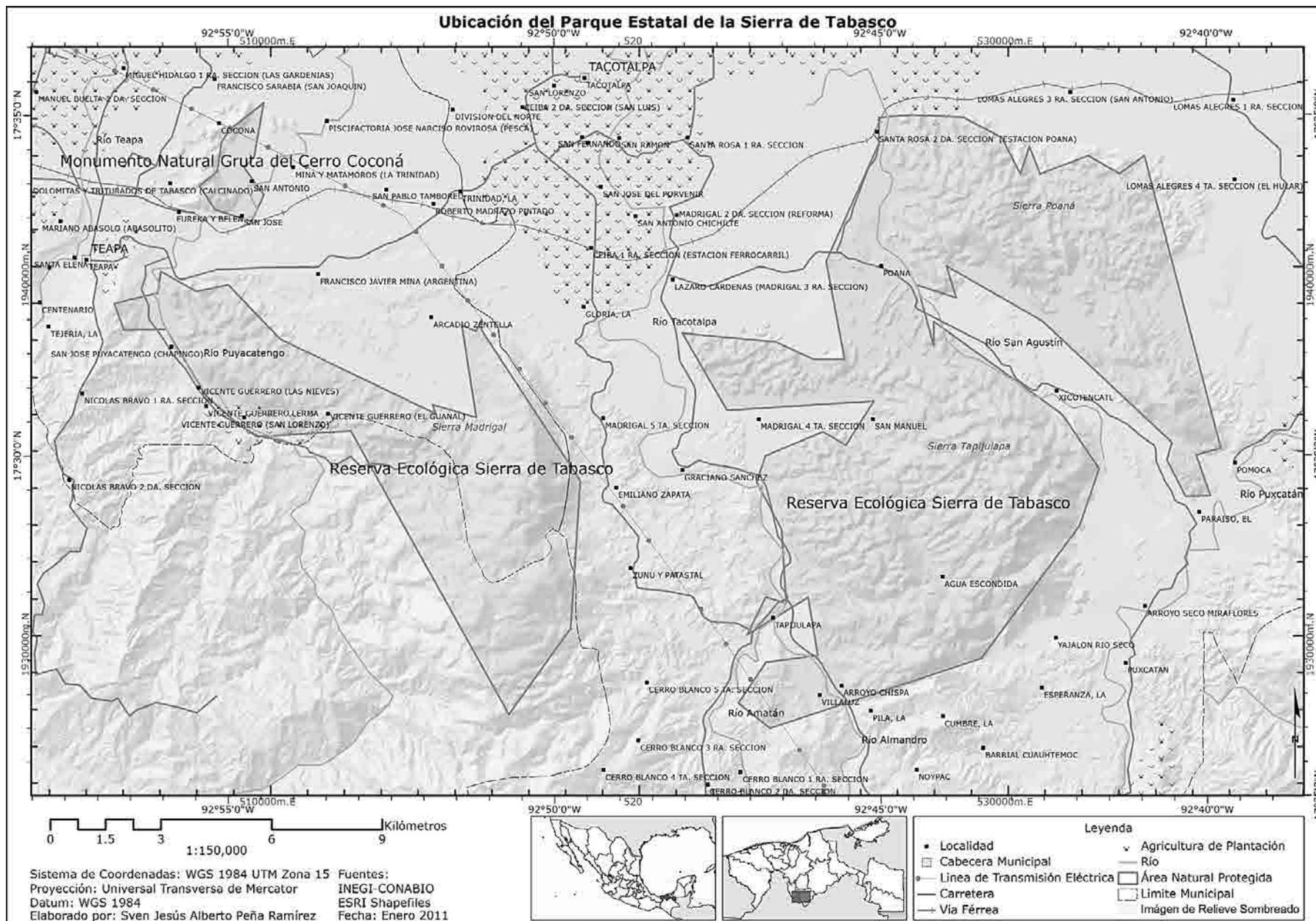
El Parque Estatal de la Sierra de Tabasco se ubica entre las coordenadas extremas de los 17°26' a 17°35' de latitud norte y de los 92°39'47" a 92°56'44" de longitud oeste (Vargas Márquez, y otros, 2002) (**Mapa 1**), y se localiza dentro de la Región del Grijalva, Subregión de la Sierra, a 50 Kilómetros al sur-sureste de la ciudad de Villahermosa, abarcando la porción sur del Municipio de Teapa y la central-oeste del Municipio de Tacotalpa, en colindancia con el estado de Chiapas en su límite sur. Esta ANP tiene una superficie de 151.132 Km² ¹⁵, ocupando una extensión máxima de 16.537453Km de norte a sur y 30.017798Km de este a oeste. Este Parque representa el 4.68% del total de superficie de conservación en el estado, repartida en áreas naturales protegidas tanto estatales como federales (Gobierno del Estado de Tabasco, 2007).

En lo subsecuente, “Parque Estatal de la Sierra de Tabasco” se utilizó para referirse al área que ocupa dicho parque así como su área de influencia (incluyendo el Monumento Natural Gruta del Cerro Coconá).

¹³ Publicado en el Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Tabasco.

¹⁴ Datos conforme a decreto (Vargas Márquez, y otros, 2002). El área medida con base en el polígono de ésta ANP es de 2.85117 Km² (Bezaury Creel, y otros, 2009).

¹⁵ Datos conforme a decreto (Vargas Márquez, y otros, 2002). El área medida con base en los polígonos de ésta ANP es de 167.46274 Km² (Bezaury Creel, y otros, 2009).



Mapa 1. Ubicación del Parque Estatal de la Sierra de Tabasco

2.5 CARACTERIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.5.1 CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO NATURAL

2.5.1.1 GEOLOGÍA

2.5.1.1.1 EVOLUCIÓN GEOLÓGICA

Esta región ha tenido una evolución geológica en general reciente y con poca variación, esto ha quedado evidenciado tras las exploraciones realizadas por Petróleos Mexicanos. Se ha determinado una correlación entre las estructuras subterráneas de la planicie tabasqueña y la geología superficial de la Sierra de Chiapas, la cual consiste en que esta planicie se encuentra sobre calizas plegadas y falladas, y éstas a su vez sobre un basamento cristalino que aflora en el Soconusco, al sur de Chiapas.

Se considera que al comienzo del período Cretácico, se formó un gran banco calcáreo debido a la transgresión marina, dando origen a la sedimentación y depósito de carbonatos en la península de Yucatán, en Tabasco y Chiapas; y al desarrollo de depósitos de talud bordeando el bloque calcáreo. Durante el período Terciario se inicia la sedimentación terrígena marina a consecuencia del levantamiento de la porción occidental de México y el plegamiento de la Sierra Madre Oriental, de manera que los depósitos calizos fueron cubiertos en su mayoría por los depósitos del Terciario. Finalmente, los procesos geodinámicos consecuentes al levantamiento tectónico resultan en los depósitos del Cuaternario (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006) (**Figura 4**).

2.5.1.1.2 TECTÓNICA

Se reconocen tres etapas en la evolución tectónica de la región. La primera, ocurrida durante el Cretácico tardío, se caracteriza por la ocurrencia de la Orogenia Laramide, la cual generó eventos compresivos que plegaron las rocas sedimentarias depositadas durante el Jurásico y la formación de la Sierra Madre Oriental, lo que originó geoformas representadas por cabalgaduras, anticlinales y sinclinales con una orientación preferencial noroeste-sureste. Los anticlinales resultantes son alargados de tipo *recumbente*¹⁶ y cilíndrico, con altitudes que van de los 200 a los 900 msnm; los anticlinales recumbentes presentes en el área de estudio son Primavera y Primavera 1 en la sierra Madrigal, y los de tipo cilíndrico con cierres periclinales están representados por el anticlinal Miraflores en la sierra Tapijulapa; a los sinclinales de tipo recostado corresponde el de Tacotalpa, a lo largo del curso del río del mismo nombre. En esta misma etapa se desarrollaron una serie de depresiones o cuencas (Comalcalco y Macuspana), donde se depositaron gruesas capas de lutita y arenisca durante el Cenozoico (Islas Tenorio, y otros, 2005) (**Mapa 2**) (**Figura 3**) (**Figura 4**).

En la segunda etapa ocurrió una intrusión de masas salinas sobre las capas superiores a través de planos y ejes de falla generando deformación tipo cómica con distribución irregular.

En la tercera etapa, ocurrida durante las épocas del Mioceno superior al Pleistoceno, tiene lugar la Orogenia Chiapaneca, movimiento tectónico distensivo que generó desplazamientos laterales izquierdos asociados al sistema Polochic-Motagua de edad Mioceno-Plioceno; razón por la cual, el relieve se expresa como bloques que superficialmente definen valles tectónicos¹⁷. La existencia de estas fosas y pilares originó cuencas con desarrollo independiente y de características particulares, las cuencas de mares someros y con abundante materia orgánica formaron rocas generadoras de hidrocarburos, y aquellas cuencas menos profundas (evaporíticas)

¹⁶ Es aquel pliegue cuyo plano axial se encuentra muy inclinado u horizontal. En estos casos se puede producir una inversión del registro estratigráfico (Tarbuck, y otros, 2005).

¹⁷ *Grabens*.

resultaron en gruesos horizontes de yeso y sales (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006). Las estructuras de régimen frágil asociadas a esta etapa, se encuentran representadas en la falla normal de Cerro Blanco, con orientación noreste (Islas Tenorio, y otros, 2005) (**Mapa 2**) (**Figura 3**) (**Figura 4**).

2.5.1.1.3 ESTRATIGRAFÍA

Las rocas del Cretácico superior conforman una alternancia de caliza y lutita del Campaniano-Maastrichtiano (KcmCz-Lu) y corresponden a las Formaciones Angostura-Jolpabuchil. Estas rocas presentan diferentes grados de fracturamiento con huellas de disolución, en colores gris claro y oscuro, y contienen fósiles como: fragmentos de ostrácodos, gasterópodos y pelecípodos, espículas de equinodermos y algunos miliólidos entre otros, que indican *facies*¹⁸ de plataforma de aguas relativamente profundas y lagunares (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006). Se caracterizan por formar montañas escarpadas con alto desarrollo kárstico y generalmente constituyen el núcleo de anticlinales, las mayores elevaciones formadas por esta unidad litológica son las sierras de Madrigal, Tapijulapa y Poaná (dentro del área de estudio) y otras localizadas al este de Tapijulapa y sureste de Tenosique, también dentro del estado de Tabasco. El contacto inferior a las Formaciones Angostura-Jolpabuchil es transicional con caliza y dolomía del Aptiano-Santoniano (KapssCz-Do) correspondientes a la Formación Sierra Madre (**Figura 2**).

Por encima de las Formaciones Angostura-Jolpabuchil se identifica la cuenca Sierra de Chiapas, que junto con la cuenca de Macuspana, son las dos provincias geológicas presentes en el área de estudio (**Figura 2**). La cuenca Sierra de Chiapas consiste en una discordancia de depósitos de lutita y arenisca del Paleoceno (TpaLu-Ar) representada en la Formación Soyaló de facies de cuenca y lomeríos superficiales suaves y alargados, la cual aflora al sur de Teapa, en los alrededores de Tapijulapa, Tacotalpa. Esta Formación subyace a limolita y arenisca del Eoceno (TeLm-Ar), depositadas en un ambiente litoral y continental de la Formación El Bosque, entre las cuales predominan las areniscas de grano medio dispuestas en estratos de color pardo, rojo y púrpura, que contienen granos angulosos y sub redondeados de cuarzo y que presentan zoneamientos; así como micas contenidas en feldspatos y cuarzo; y limolitas de tipo calcáreo arcillosa en capas de espesor medio. La Formación El Bosque esta expresada en lomeríos y planicies al sur y este de Macuspana y al este de la Sierra Poaná. Durante el Oligoceno ocurre la sedimentación de caliza, lutita y arenisca, de las Formaciones Mompuyil (ToCz-Ar) y Simojovel-Yolho (ToAr-Lu), las cuales subyacen a lutita, caliza y arenisca de la Formación Tulija (TmLu-Cz), unidades que afloran al sur del área de estudio (Islas Tenorio, y otros, 2005).

En la zona correspondiente a la llanura costera afloran unidades de la cuenca Macuspana, cuyo desarrollo data del Mioceno-Pleistoceno, y está representada por la Formación Macuspana (TmCz-Lu) de edad Mioceno, cubierta por depósitos del Mioceno-Pleistoceno de las Formaciones Encarnación, Amate Inferior, Amate Superior, Encajonado, Zarzagal, Belem, Tres Puentes y Tierra Colorada (TmQptAr-Lu), las cuales son escasas en afloramientos y no están representadas en el área de estudio.

El Plioceno es escenario de un evento magmático representado por rocas intrusivas de composición granodiorítica-diorítica (TplGd-D), asociadas a un evento volcánico de composición andesítica (TplBvA-A), éstas últimas corresponden a andesitas de augita, de textura porfídica de color gris en roca sana e intemperizada, muestra tonos amarillentos por efectos de la alteración a arcillas. Sobre yace discordantemente a depósitos terrígenos del terciario. Posee morfología de mesas moderadamente disectadas y de lomeríos aflorando en el sur, este y oeste de Teapa. Es durante el Pleistoceno al Holoceno cuando se desarrolla el vulcanismo que originó al volcán Chichonal (**Figura 2**).

¹⁸ Porción de una unidad litológica que posee un conjunto distintivo de características que la distingue de otras partes de la misma unidad (Tarbuck, y otros, 2005).

Finalmente, el depósito de sedimentos recientes de arena y limo (Qptar-lm), materiales de ambiente *aluvial*¹⁹ (Qhoal), lacustre (Qhola) y palustre (Qhopa) tuvo lugar durante el Pleistoceno y Holoceno, se encuentran ampliamente distribuidos en todo Tabasco y su espesor se incrementa en un gradiente sur – norte partiendo de los pies de monta y hasta la zona litoral y deltaica. Dos son los depósitos cuaternarios más abundantemente presentes en el área de estudio, los depósitos palustres (Qhopa), formados por arcillas, limos y arenas con abundante materia orgánica, resultado de las constantes inundaciones que se presentan en zonas pertenecientes a la llanura Costera del Golfo Sur. Estos depósitos son escasos en el área de estudio y se incrementan en magnitud hacia el norte de ésta; y los sedimentos formados por limos, arcillas y cuerpos lenticulares de arena y grava de origen fluvial (Qhoal), que se han formado en la planicie de inundación de los ríos del estado, constituyendo las partes más bajas y planas de la llanura costera (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006) (**Figura 2**) (**Mapa 2**).

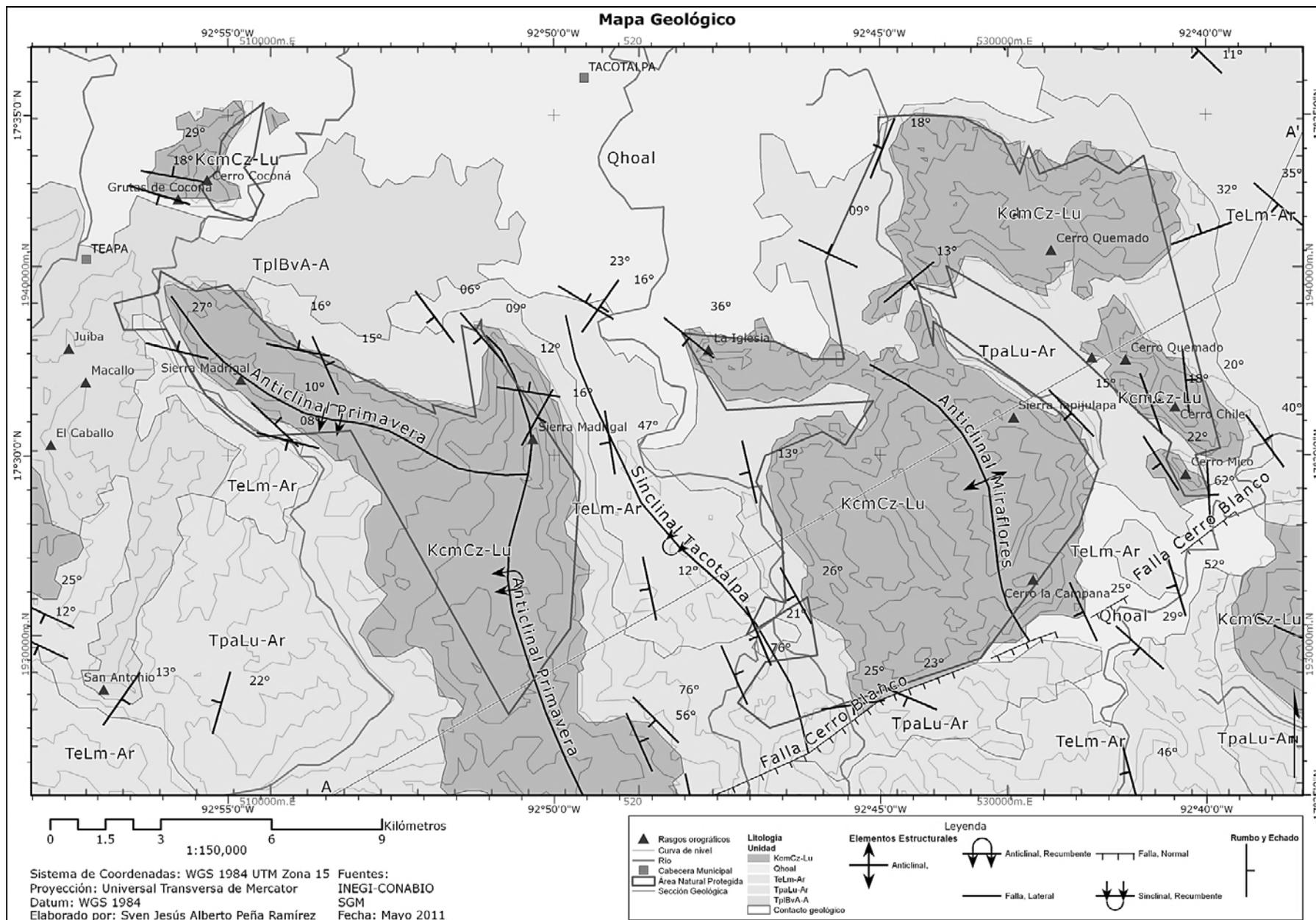
2.5.1.1.4 RIQUEZA LITOLÓGICA

Tabla 1. Riqueza litológica en el Parque Estatal de la Sierra de Tabasco y zona de influencia

| Roca o Depósito | Unidad | Formación | Características |
|-------------------|----------|-----------------------|---|
| Caliza-Lutita | KcmCz-Lu | Angostura-Jolpabuchil | Unidad del Cretácico Superior, constituida por rocas carbonatadas depositadas en un ambiente marino de plataforma. El espesor de los estratos varía de mediano a grueso, es fosilífera y está fuertemente fracturada. Debido a la disolución presenta rasgos kársticos. |
| Lutita-Arenisca | TpaLu-Ar | Soyaló | Unidad del Paleoceno, que consiste en una discordancia de depósitos de lutita y arenisca, con facies de cuenca y lomeríos superficiales suaves y alargados. |
| Limolita-Arenisca | TeLm-Ar | El Bosque | Unidad del Eoceno, conformada por limolita y arenisca depositadas en un ambiente litoral y continental. Predominan las areniscas dispuestas en estratos gruesos. Las limolitas son calcáreo-arcillosas en estratos medianos. Se expresan morfológicamente en lomeríos en los valles intermontanos, planicies y colinas alargadas que bordean la sierra. |
| Andesita | TplBvA-A | - | Unidad del Plioceno que corresponde a un evento volcánico de composición andesítica con <i>textura porfídica</i> ²⁰ , que posee morfología de mesas moderadamente disectadas y de lomeríos. |
| Palustre | Qhopa | - | Unidad del Holoceno, formada por arcillas, limos y arenas con abundante materia orgánica producto de inundaciones recurrentes. |
| Aluvión | Qhoal | - | Unidad del Holoceno, que consiste en sedimentos formados por limos, arcillas y cuerpos lenticulares de arena y grava de origen fluvial, formados en la planicie de inundación de los ríos. |

¹⁹ De sedimento arrastrado por las lluvias o las corrientes.

²⁰ Aquella en la que la roca tiene grandes cristales incrustados en una matriz de cristales más pequeños (Tarbuck, y otros, 2005).



Mapa 2. Mapa Geológico

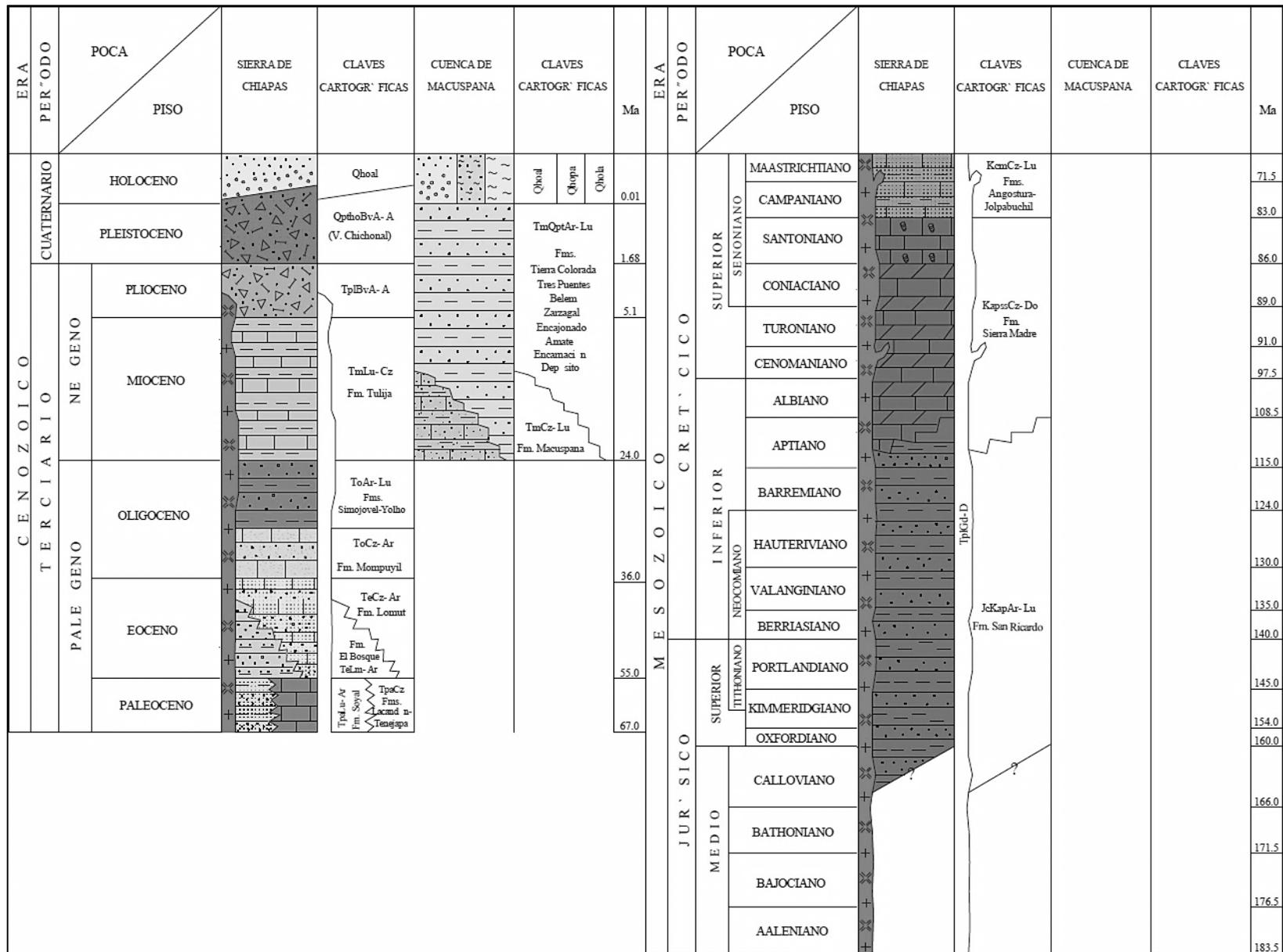


Figura 2. Columna Estratigráfica del Parque Estatal de la Sierra de Tabasco y zona de influencia (Islas Tenorio, y otros, 2005)

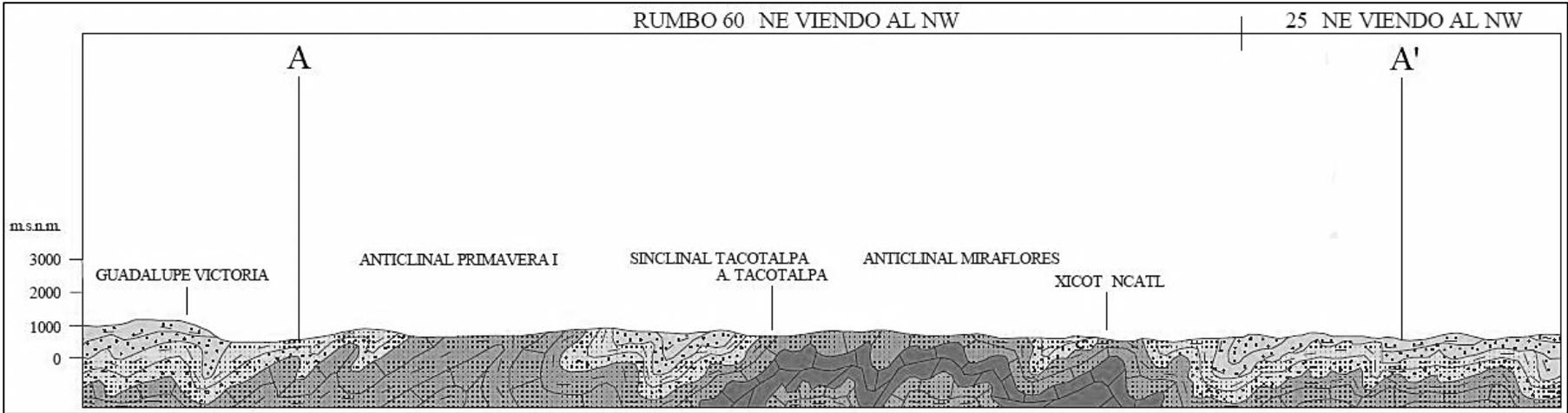


Figura 3. Sección geológica A-A
Modificado de (Islas Tenorio, y otros, 2005)

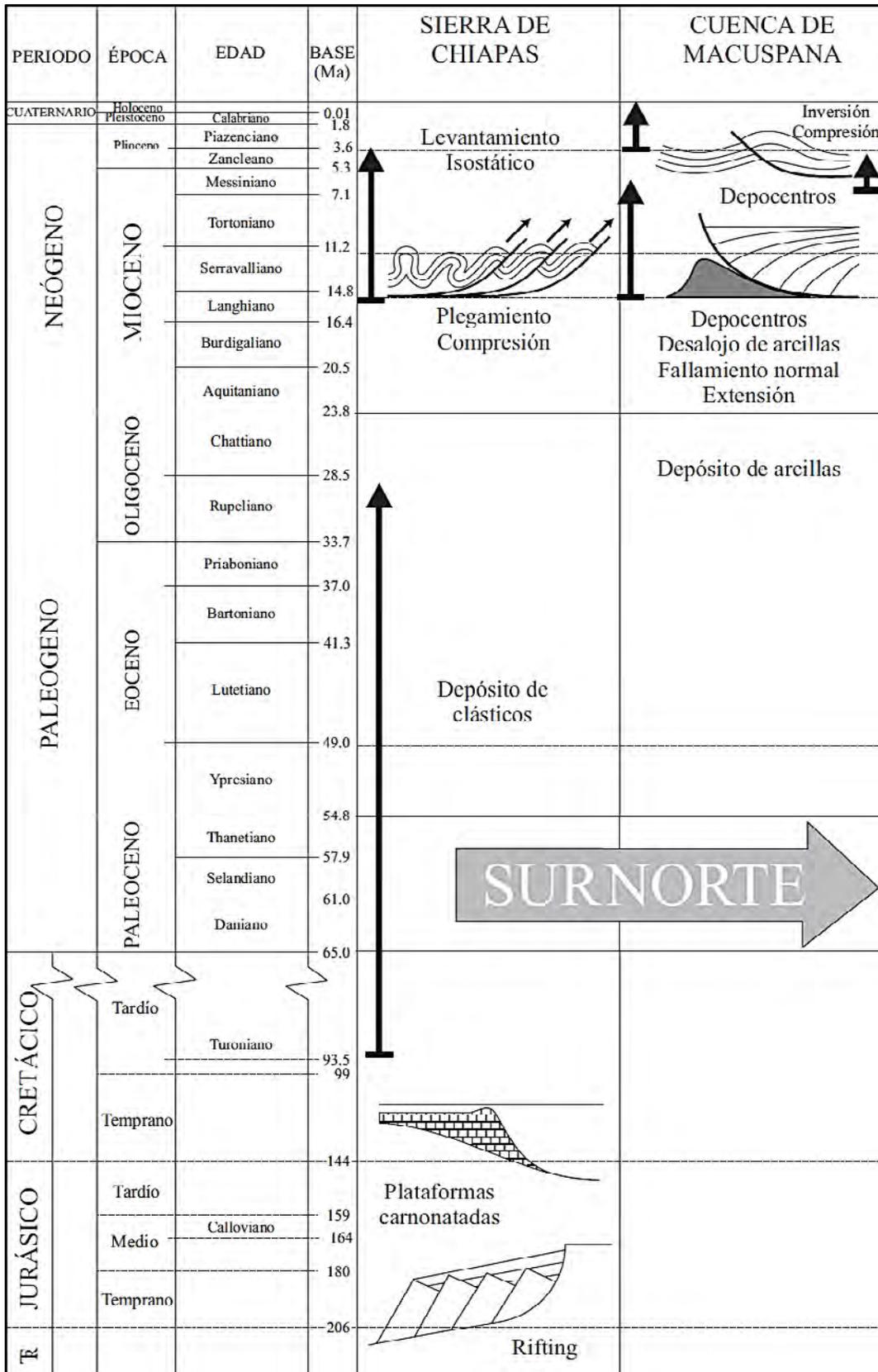


Figura 4. Representación esquemática cronológica de los eventos tectónicos que afectaron las cuencas de Sierra de Chiapas y Macuspana
 Modificado de (Padilla y Sánchez, 2007)

2.5.1.1.5 RIESGOS GEOLÓGICOS

El área de estudio se encuentra sobre la Placa Norteamericana, y por su posición geográfica, tiene influencias de las Placas del Caribe y de Cocos, ambas ubicadas hacia el sur. Debido a esta razón, un considerable número de epicentros, de terremotos de gran magnitud, se registran en la costa de Chiapas, centro y norte del mismo estado (Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2006)²¹. El área comprendida por el Parque Estatal de la Sierra se considera dentro del grado 7 de intensidad sísmica, según la escala de Mercalli²² (Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2006), y de *peligro*²³ sísmico bajo, esto significa que aunque los sismos son de menor frecuencia en ésta región, sí son de intensidad considerable (Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2006).

2.5.1.2 FISIOGRAFÍA Y GEOMORFOLOGÍA

Las altas precipitaciones en la planicie tabasqueña y estribaciones de la Sierra de Chiapas, contribuyen a escurrimientos que, junto con la geología de la región, han definido la morfología del relieve al fluir por un complejo sistema de cauces, cuerpos de agua y zonas de inundación (Tudela, 1989).

El Parque Estatal de la Sierra de Tabasco se encuentra dentro de la provincia fisiográfica "Sierras de Chiapas y Guatemala", subprovincia "Sierras del Norte de Chiapas", la cual abarca las Sierras Madrigal, Tapijulapa y Poaná (Islas Tenorio, y otros, 2005), en la parte sur de los municipios de Teapa y Tacotalpa, limitando al norte con la provincia "Llanura Costera del Golfo Sur", subprovincia "Llanura y Pantanos Tabasqueños" (Cervantes Zamora, y otros, 1990) (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2009) (**Mapa 3**).

La subprovincia "Sierras del Norte de Chiapas" está constituida por paisajes de sierra plegada, piedemontes, valles y cañones con ejes orientados noroeste-sureste. En esta subprovincia se encuentran depósitos sedimentarios de calizas y secuencias de lutita-areniscas, conglomerados y material aluvial, así como afloramientos de rocas volcánicas de composición intermedia y cuerpos intrusivos asociados al volcán Chichonal. Dentro del área de estudio, el karst se observa en las zonas de afloramiento calcáreo, principalmente en el municipio de Tacotalpa y sur de Teapa, donde se reportan un gran número de cavernas y afloramientos, destacando las grutas de Coconá en Teapa y las cuevas de Tapijulapa en Tacotalpa. La red hidrológica superficial es de tipo dendrítica con drenajes cortos y torrenciales, que en parte desaparecen en *dolinas*²⁴, grutas y fracturas, constituyendo las corrientes subterráneas asociadas al karst. La geomorfología de ésta subprovincia es en general de sierra compleja, donde se pueden encontrar valles de laderas tendidas, valles intermontanos, pequeño llano, dolina y sierras kársticas (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006).

La subprovincia "Llanura y Pantanos Tabasqueños" está formada por una planicie de composición sedimentaria y áreas pequeñas de ondulaciones y lomeríos con alturas no mayores a 50 msnm, éstas se han formado en su mayor parte por los depósitos minerales de las sierras de Chiapas y Guatemala en combinación con la regresión marina del océano Atlántico, iniciada en el Terciario inferior. Los lomeríos son resultado de los depósitos fluviales de inundación periódica, formados a lo largo de las márgenes de los principales ríos (Secretaría de Desarrollo Social y

²¹ Recientemente, en el mes de abril de 2011, se registró un sismo de 6.7 grados en la escala de Richter con epicentro en el municipio de Las Choapas, al sur de Veracruz (Ávila, 2011).

²² Todo el mundo corre al exterior. Daño insignificante en edificios de buen diseño y construcción; leve a moderado en estructuras corrientes bien construidas; considerable en estructuras pobremente construidas o mal diseñadas; se rompen algunas chimeneas. Notado por algunas personas que conducen automóviles (Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2006).

²³ Probabilidad de que ocurra un fenómeno potencialmente dañino (Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2006).

²⁴ Depresiones cerradas, de forma circular o elipsoidal en planta, de metros a un kilómetro de diámetro y su profundidad puede ser de pocos metros a más de un centenar de metros (Gutiérrez Elorza, 2008).

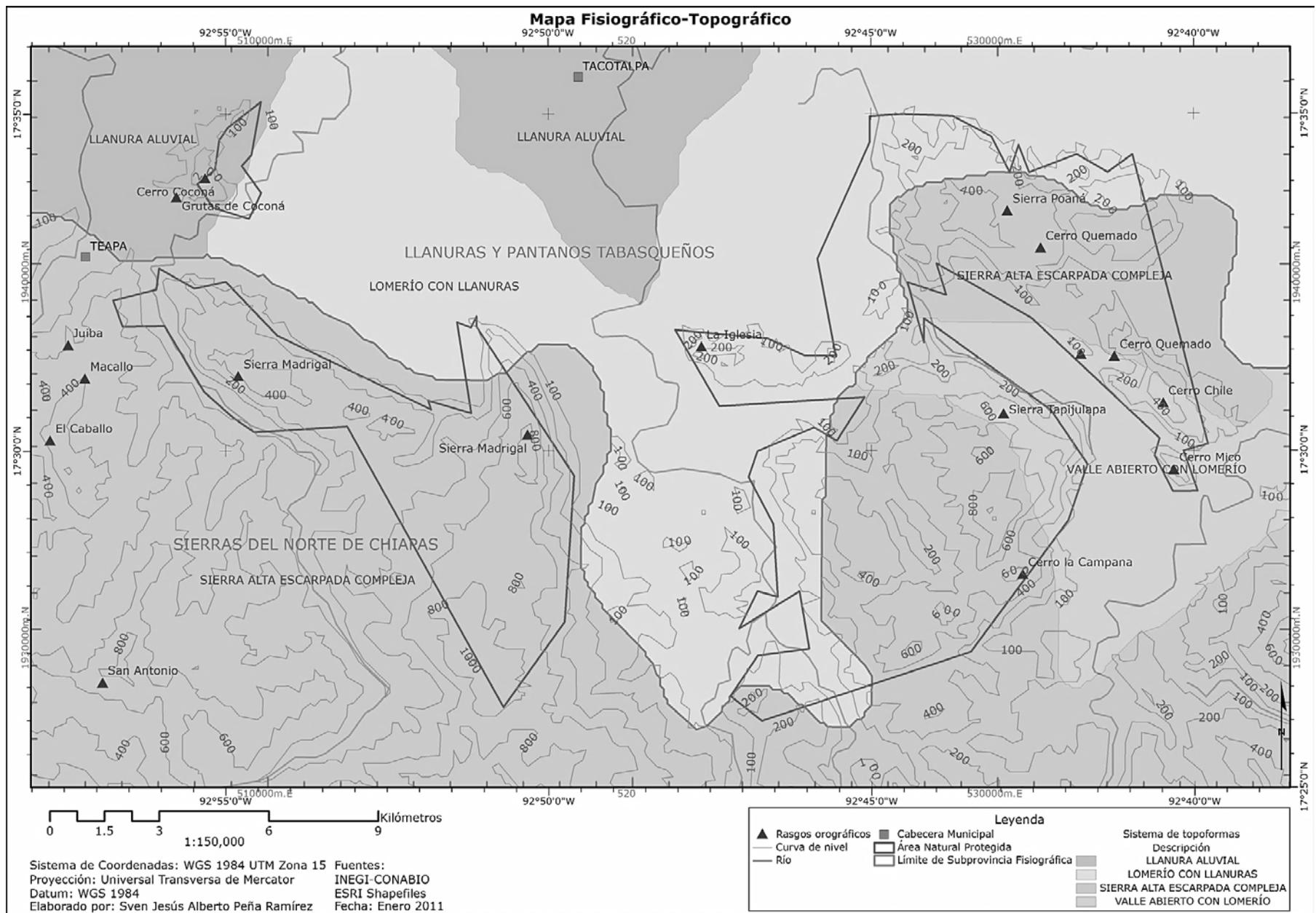
Protección al Ambiente, 2006), éste proceso se identifica con el sistema morfogénico "terrazas del Pleistoceno", las cuales van de los 20 metros de altitud y hasta los 50 msnm en la base de las colinas del Terciario. Los depósitos superficiales de las *terrazas*²⁵, se encuentran altamente intemperizados y han dado origen a *arcillas caoliníticas*²⁶ y *formas coloidales*²⁷ de sílice (Tudela, 1989).

Las principales elevaciones dentro del área de estudio son las Sierras Madrigal y Tapijulapa con 900 metros de altitud, Sierra Poaná con 560 msnm, Cerro la Campana con 820 msnm, y los cerros Quemado y Mico con 300 msnm. (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2009) (Gobierno Municipal de Tacotalpa, 2010) (**Mapa 3**).

²⁵ Superficie plana o débilmente inclinada, generalmente estrecha y alargada, delimitada por cambios bruscos de pendiente. Debe su origen a la acción del agua de un río, lago o mar que provoca un modelado (la superficie plana o rellano) (Lugo Hubp, 1989).

²⁶ Del mineral caolinita, uno de los minerales más comunes en las arcillas. Se utiliza en la fabricación de porcelana y en la producción de papel satinado.

²⁷ Partículas no perceptibles a simple vista.



Mapa 3. Mapa Fisiográfico-Topográfico

2.5.1.3 HIDROGRAFÍA

Debido a la gran cantidad de precipitaciones pluviales, y al escaso relieve presente en el estado de Tabasco, se ha desarrollado un complejo sistema hidrológico en la región. Este sistema está relacionado con fenómenos de carácter geológico, climático y biológico, los que en interacción han dado lugar a la formación de drenaje *anastomosado*²⁸, *meándrico*²⁹, dendrítico y lagunar, y en consecuencia a un gran número de cuerpos de agua, pantanos y llanuras de inundación (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006). En la llanura costera los ríos presentan cursos inestables y erráticos por la falta de pendiente y la gran acumulación de material aluvial en sus márgenes.

Por lo que respecta al Parque Estatal de la Sierra de Tabasco, el drenaje dominante en las Sierras Madrigal, Tapijulapa y Poaná es de tipo dendrítico, y es influenciado principalmente por estructuras geológicas; siendo el de tipo meándrico el más abundante en los valles intermontanos y llanuras. Estos escurrimientos corresponden a la cuenca del Río Grijalva-Villahermosa (30D), y pertenecen a la región hidrológica Grijalva-Usumacinta (RH30) en la vertiente del Golfo de México (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2009). Esta cuenca cubre en su totalidad los municipios de Teapa y Tacotalpa, y en el área de estudio, se encuentran presentes las subcuencas del Río Teapa, Puyacatengo, La Sierra-Tacotalpa y Puxcatán (**Mapa 4**) (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2009). Todos estos escurrimientos provienen de la cuenca alta del Río Grijalva, en el estado de Chiapas, y drenan hacia el Golfo de México, siendo importantes afluentes de la corriente principal.

Los *coeficientes de escurrimiento*³⁰ que predominan en la cuenca Grijalva-Villahermosa, son de 20 a 30% y mayor de 30%, debido a la combinación de dos factores principalmente, el edáfico como la permeabilidad alta en materiales no consolidados, que corresponden a los suelos aluviales y a las terrazas, y permeabilidad baja en materiales no consolidados, en los suelos palustres, lacustres y litorales; y el relacionado con la vegetación, que resulta en permeabilidad media en sitios con vegetación no muy densa, y permeabilidad baja donde la vegetación es densa. El volumen de escurrimiento de la cuenca en el estado de Tabasco es de 10,586.6 millones de m³ anuales (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006).

Los cambios en la hidrología natural de la llanura aluvial y valles intermontanos, son generados principalmente por la deforestación y el desarrollo de la infraestructura hidráulica³¹ y de comunicaciones terrestres³². Estos cambios se han visto reflejados en el incremento de la erosión y pérdida de suelos, dificultad en el transporte de sedimentos, disminución de la infiltración pluvial, inundaciones y alteraciones en las características estructurales y funcionales de los ecosistemas (principalmente en las zonas de inundación)³³.

La obra hidráulica más importante construida sobre el cauce del Río Grijalva es la presa Nezahualcóyotl, localizada en el territorio Chiapaneco. Ésta ha permitido disminuir las inundaciones que afectan centros poblacionales como Huimanguillo, Cárdenas y Villahermosa, además de apoyar proyectos agropecuarios y generar energía eléctrica (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006).

²⁸ Corrientes fluviales con múltiples cauces o diversos elementos del mismo.

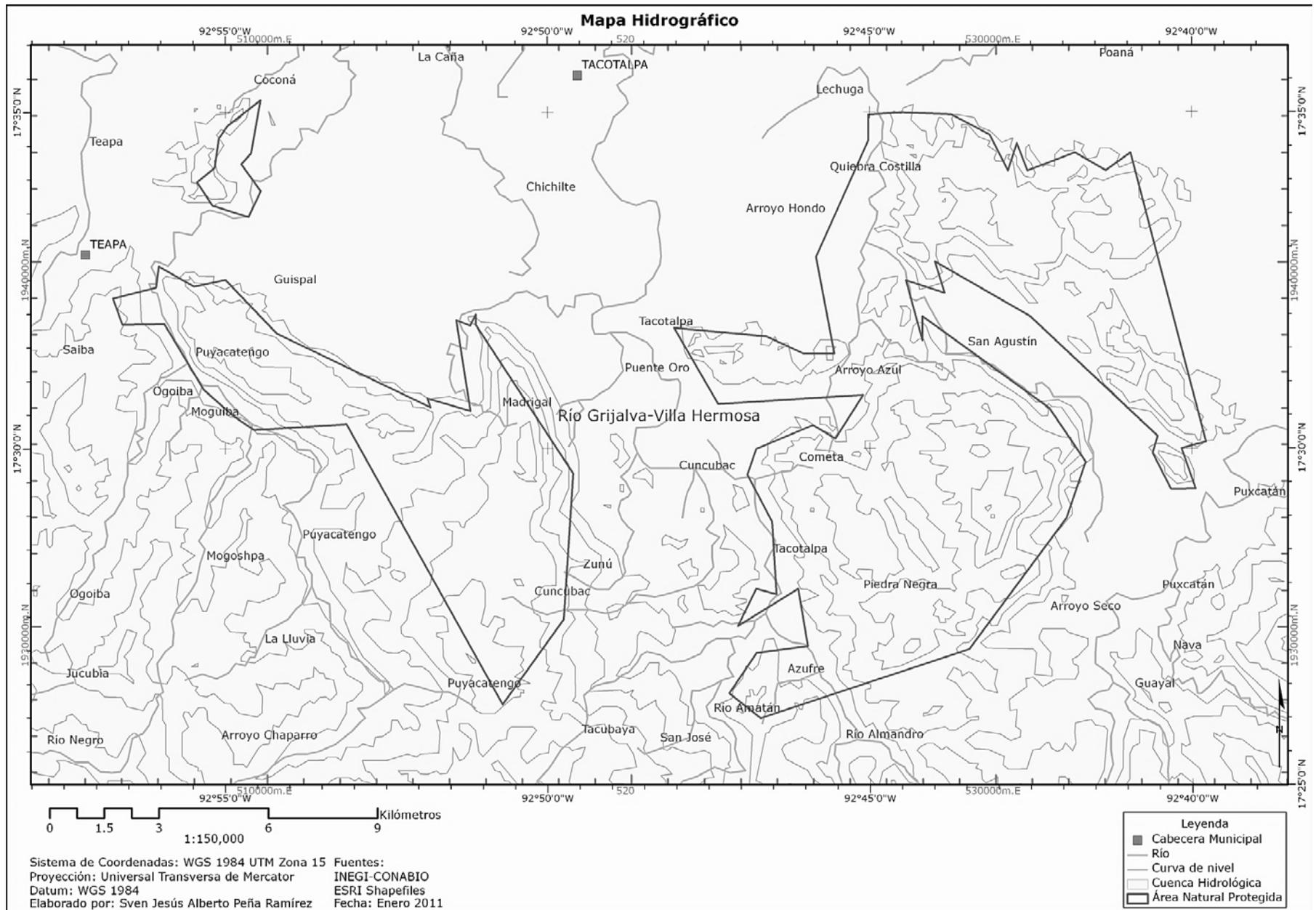
²⁹ Corrientes fluviales con alta sinuosidad en el cauce.

³⁰ Relación entre la lámina de agua precipitada sobre una superficie y la lámina de agua que escurre superficialmente, (ambas expresadas en mm).

³¹ Que en el caso de Tabasco ha sido de forma diferencial.

³² La infraestructura carretera, por ejemplo, ha actuado como un conjunto de diques que dificultan los flujos naturales de la red hidrológica.

³³ Por ejemplo, las lagunas costeras ven afectada su cualidad de agua salobre, debido a la gran variación en su salinidad, consecuencia de los enormes aportes fluviales que reciben en los meses más lluviosos, en contraste con los escasos aportes fluviales en los meses más secos.



Mapa 4. Mapa Hidrográfico

2.5.1.4 CONDICIONES CLIMÁTICAS

2.5.1.4.1 CLIMA

Las características climáticas en el área de estudio son bastante homogéneas, y están determinadas por su ubicación en la zona intertropical, a una latitud de $17^{\circ} \pm 30'N$, su altitud relativamente escasa y la influencia marítima del Golfo de México. El clima en el Parque Estatal de la Sierra de Tabasco, y extremo sur central de la subprovincia "Llanura y Pantanos Tabasqueños", es de tipo Af, cálido húmedo con lluvias todo el año³⁴ (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2009) (**Mapa 5**). Este clima presenta periodos marcados de lluvias (8 meses) y sequía (4 meses) definidos por tres características: Temporal, Nortes y Seca (**Tabla 2**) (**Figura 5**) (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006). Con base en datos de la estación meteorológica Teapa (Clave: 27-055; coordenadas: $17^{\circ}32'53''N$, $92^{\circ}57'10''W$, altitud: 72m.) y en el sistema modificado de clasificación climática de Enriqueta García, el clima es de tipo Af(m)(i)gw", cálido húmedo con régimen de lluvias intermedio, con poca oscilación anual de las temperaturas medias mensuales, marcha anual de la temperatura tipo Ganges³⁵ y con presencia de canícula (García, 1988).

Tabla 2. Distribución de los periodos de lluvias y sequía en el estado de Tabasco³⁶

| Meses | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | E |
|----------------|--------|---|---|---|----------|---|----------|---|--------|---|---|---|
| Característica | Seca | | | | Temporal | | | | Nortes | | | |
| Periodo | Sequía | | | | | | Lluvioso | | | | | |

El Temporal se extiende de mediados de junio a mediados de septiembre y se produce por precipitaciones de tipo convectivo-orográfico producto de los *vientos alisios* del este y noreste³⁷, con lluvias que generalmente son de corta duración y gran intensidad, presentándose casi siempre por las tardes y noches con altas temperaturas y en las mañanas con insolación intensa. En los primeros tres meses de este periodo se presentan lluvias de moderadas a fuertes, mientras que en septiembre tienen lugar lluvias de fuertes a torrenciales. Dentro de este periodo se presenta la *canícula*³⁸ que abarca de la segunda quincena de julio a gran parte del mes de agosto, y se caracteriza por altas temperaturas y días secos bochornosos dentro de una fase húmeda (**Figura 5**). Además esta zona se ve afectada indirectamente por ciclones tropicales que se producen en el verano y otoño en los océanos Atlántico y Pacífico, que favorecen la ocurrencia de lluvias intensas en la región.

³⁴ Con base en la clasificación climática de Koeppen.

³⁵ Mes más caliente anterior al solsticio de verano.

³⁶ Modificado de (Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental, 2006).

³⁷ Masas de aire caliente y húmedo.

³⁸ Sequía interestival, siendo el estío la estación del año que astronómicamente principia en el solsticio de verano (21 de junio) y termina en el equinoccio de otoño (22 de septiembre).

Los Nortes están representados por vientos anticiclónicos cargados de humedad. Estos son producto del intercambio de aire de un ciclón que se aleja por el Mar Caribe y Golfo de México, así como de los frentes fríos, vientos provenientes del noreste. Los Nortes producen nublados constantes, disminución de la temperatura y lluvias de ligeras a fuertes con duración prolongada. Estos fenómenos atmosféricos se presentan de septiembre a febrero, ocasionando que septiembre y octubre sean los meses más lluviosos del año (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006).

La Seca se presenta de fines de febrero hasta principios de junio y se caracteriza por la presencia de altas temperaturas, vientos cálidos del sur y sureste, ausencia de nubosidad, y largos lapsos sin lluvia, que pueden alcanzar semanas e incluso rebasar el mes. Sin embargo, las condiciones climáticas de la región, siempre permiten la presencia de lluvias aisladas que abarcan zonas reducidas. Las menores precipitaciones del año se presentan en el mes de abril.

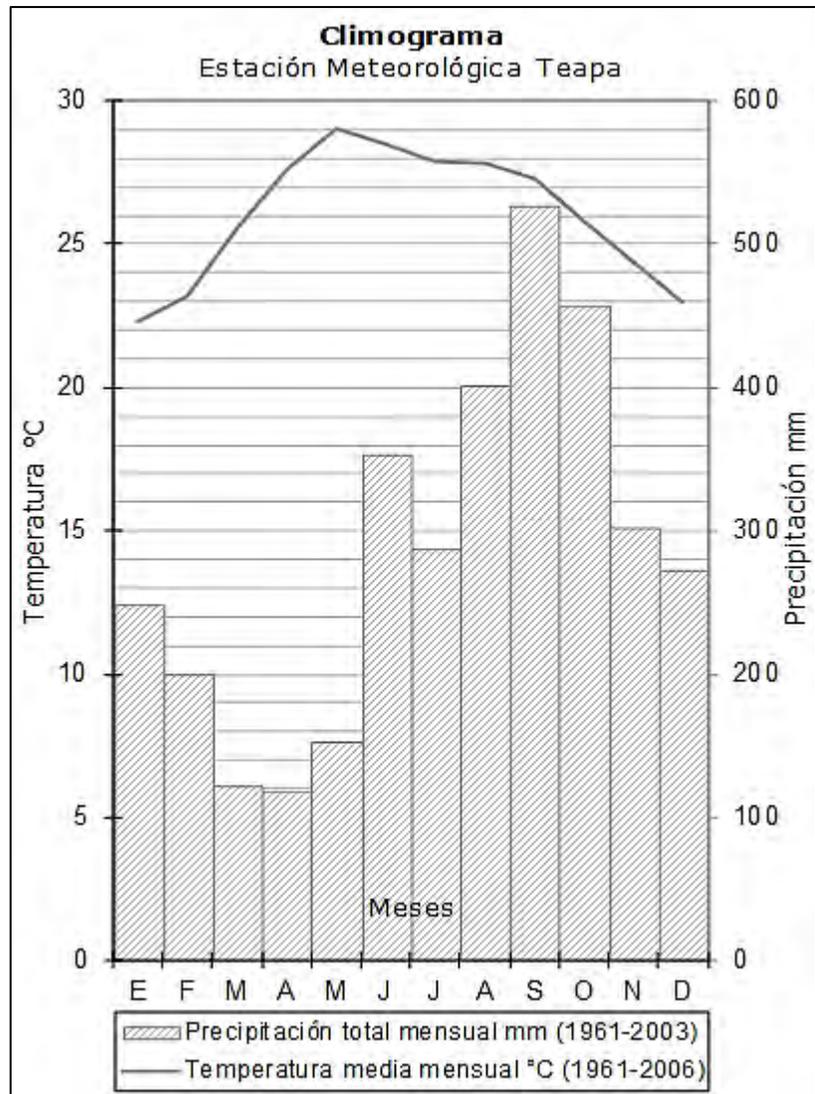


Figura 5. Climograma de la Estación Meteorológica Teapa

Aunque no se tiene evidencia clara de transformaciones climáticas de gran escala en un periodo reciente, sí es posible comprobar que se han generado cambios importantes a nivel microclimático. Los principales factores desencadenantes de estos cambios son la deforestación y la alteración hidrológica. La destrucción de selvas elimina la diferenciación vertical de temperatura entre los diferentes estratos vegetales que existían, además de generar amplias fluctuaciones en la temperatura superficial por el incremento de las temperaturas máximas (Tudela, 1989).

2.5.1.4.2 TEMPERATURA

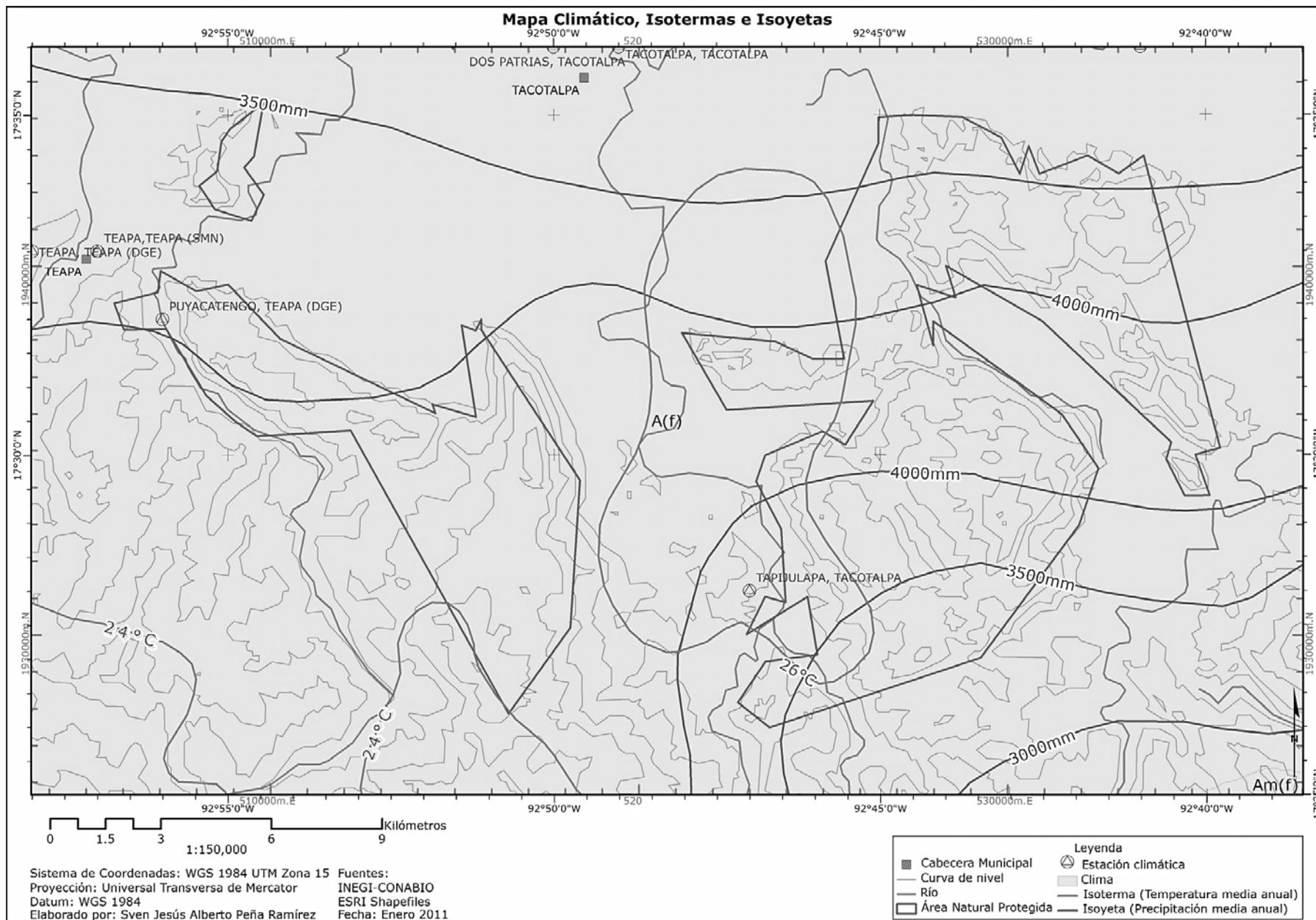
Las temperaturas son elevadas y presentan una ligera variación espacial y temporal (Mapa 5). La temperatura media anual para el periodo 1961-2006, registrada en la estación meteorológica Teapa es de 25.6°C, magnitud en que se ve reflejado el incremento térmico regional de las últimas décadas (Cardoso C., 1979), posible resultado del reciente calentamiento global. La temperatura máxima se registra antes de la estación lluviosa y del solsticio de verano, en mayo, con un valor medio superior a los 29°C. La temperatura media más baja supera los 22°C y se presenta en enero (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2009).

La variación espacial de la temperatura está en función del relieve, mientras que la variación temporal depende de la influencia de fenómenos meteorológicos. Los Nortes producen mínimas extremas que van de los 12 a los 15°C. Las variaciones de temperatura tienen rangos mayores en los registros diurnos que en los promedios de largo plazo (Tudela, 1989).

2.5.1.4.3 PRECIPITACIÓN

La pluviosidad anual es variable en todo el estado de Tabasco; a un año de inundaciones con potenciales consecuencias catastróficas para la población puede suceder otro de relativa sequía. La precipitación media anual presenta un rango de variación que va de los 3000 mm al norte de la localidad de Tacotalpa, hasta los 4500 mm registrados al sur de la localidad de Teapa y en las Sierras Madrigal y Tapijulapa (**Mapa 5**). La precipitación media anual para el periodo 1961-2003, registrada en la estación Teapa es de 3441.9mm. Las lluvias son estacionales y están relacionadas con las características de Seca, Temporal y Nortes, anteriormente mencionados. Las mayores precipitaciones se registran entre los meses de septiembre y octubre con magnitudes medias mensuales poco mayores a los 500 mm, mientras que el periodo más seco se ubica en marzo y abril, con una intensidad media mensual de precipitación de 118 mm. La precipitación invernal se debe principalmente a la influencia de los Nortes.

En los últimos años se han registrado numerosas inundaciones en el curso de los ríos de la región, con elevaciones de hasta 31 centímetros por encima del nivel máximo de los cauces (Cable News Network, 2010). Es probable que este fenómeno tenga su origen en los cambios regionales de la red hidrológica natural, la deforestación, los cambios en el uso de suelo, alteraciones microclimáticas e incluso el cambio climático global y la aceleración del ciclo hidrológico.



Mapa 5. Mapa Climático, Isotermas e Isoyetas

2.5.1.5 EDAFOLOGÍA

Los suelos se encuentran ampliamente distribuidos en todo el estado de Tabasco, su espesor y abundancia se incrementa de sur a norte (Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental, 2006) y están definidos sobre todo por sus condiciones geológico-fisiográficas y por el grado de intemperismo al que han sido sometidos, adicionalmente los cambios en el régimen hidrológico y la cobertura vegetal, han determinado transformaciones edáficas considerables (Tudela, 1989).

Con base en el sistema de clasificación de suelos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO-UNESCO por sus siglas en inglés) (Base Referencial Mundial del Recurso Suelo), y en información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, existen dos grupos de suelos en el Parque Estatal de la Sierra de Tabasco: Luvisol y Gleysol (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2009) (**Mapa 6**).

Los Luvisoles poseen una diferenciación pedogenética de arcilla (especialmente migración de arcilla) entre un suelo superficial con menor y un subsuelo con mayor contenido de arcilla, arcillas de alta actividad y una alta saturación con bases a alguna profundidad; se desarrollan principalmente en tierras llanas o suavemente inclinadas en regiones templadas frescas y cálidas con estación seca y húmeda marcadas; enotan un claro enrojecimiento por la acumulación de óxidos de hierro (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007). Su material parental data principalmente del Pleistoceno y Terciario. Estos suelos son producto de un intemperismo avanzado, que resulta en una presencia abundante de caolinita y óxidos de hierro y aluminio. La mayoría de los Luvisoles son suelos fértiles y apropiados para un rango amplio de usos agrícolas, en áreas en pendiente, se usan para huertos, forestales y/o pastoreo, en *depósitos coluviales*³⁹ de meteorización de calizas las pendientes inferiores se cultivan con trigo y/o remolacha azucarera mientras que las pendientes superiores, frecuentemente erosionadas, se usan para la práctica de pastoreo extensivo o cultivos forestales. Las áreas en donde los Luvisoles han sido más intemperizados estuvieron muy probablemente cubiertas por selvas, cuya desaparición desencadenó un proceso de degradación edáfica, por erosión y *lixiviación*⁴⁰, que alteró la dinámica de sucesión ecológica y dio lugar finalmente al desarrollo de una vegetación secundaria de sabana o pastizal. Los suelos de este tipo presentan características de baja fertilidad y acidez (Tudela, 1989). Los Luvisoles se encuentran distribuidos en casi toda el área de estudio, principalmente en las zonas de lomeríos, con excepción del norte de la localidad de Teapa, presentándose los de tipo Ándico de textura fina, Calcárico de textura media, Endoléptico y Húmico de textura fina (**Tabla 3**).

Los Gleysoles son suelos de humedales que, a menos que sean drenados, están saturados con agua freática por períodos suficientemente largos para desarrollar un característico patrón de color gléyico. Este patrón está esencialmente hecho de colores rojizos, parduzcos o amarillentos en la cara de los agregados y/o en la capa o capas superficiales del suelo, en combinación con colores grisáceos/azulados en el interior de agregados y/o más profundo en el suelo. El material parental de estos suelos no está consolidado y es principalmente de origen fluvial, marino y lacustre del Cuaternario, con mineralogía básica o ácida. Estos suelos se distribuyen en áreas deprimidas y posiciones bajas del paisaje con agua freática somera. La vocación agrícola de estos suelos corresponde a cultivos arables, producción lechera y horticultura, sin embargo, debido a que su drenaje es muy lento, en condiciones de inundación su uso potencial agrícola es muy limitado (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007). Dentro del área de estudio, este grupo de suelos se distribuye principalmente al norte de la localidad de Teapa, representado por los Gleysoles de tipo Húmico, Mólico y Vértico de textura fina (**Tabla 3**).

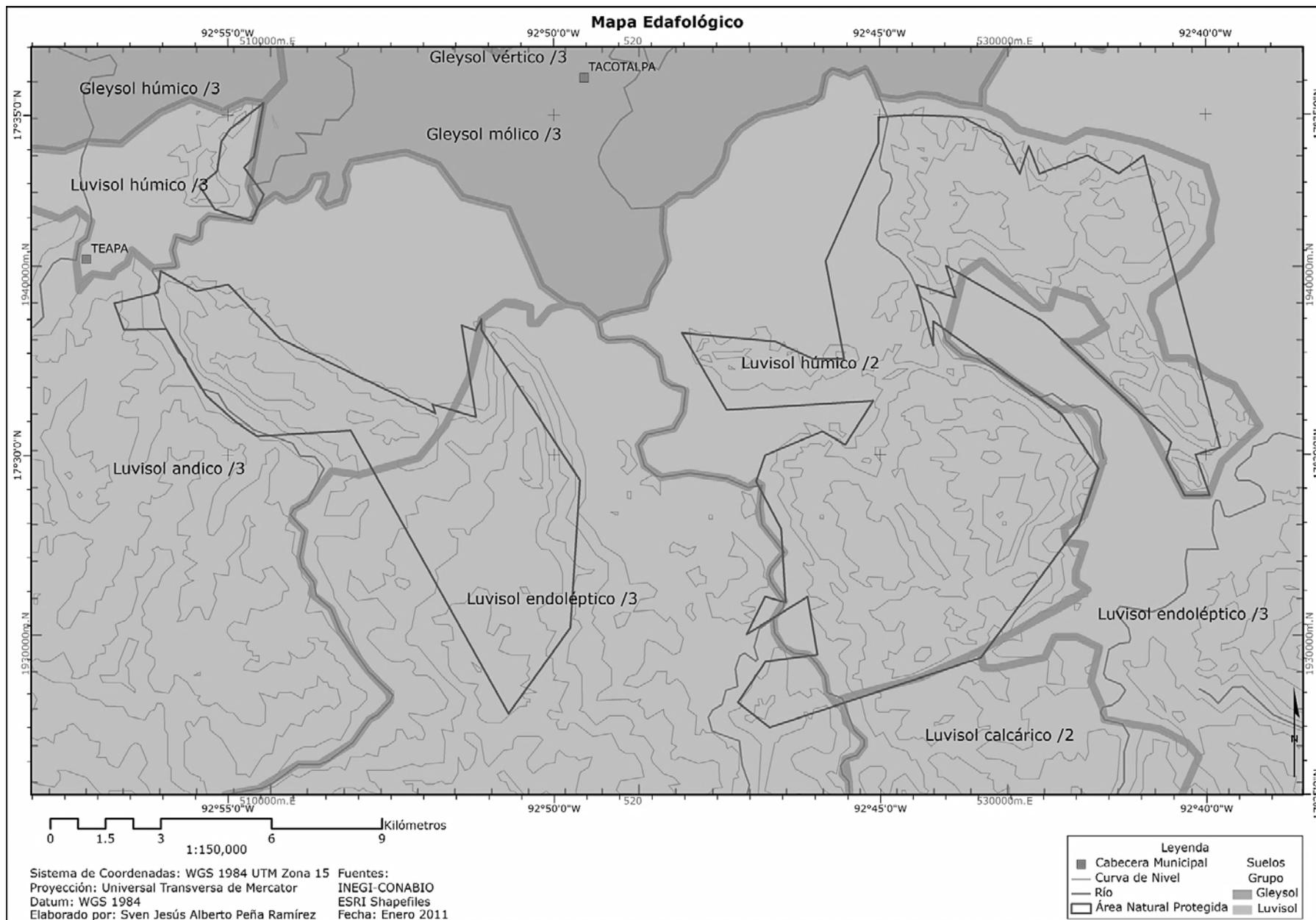
³⁹ Material acumulado por procesos gravitacionales formando taludes y conos de derrubios al pie de escarpes, cuya composición es idéntica al material originario.

⁴⁰ Empobrecimiento de materiales solubles de la zona alta del suelo.

Tabla 3. Suelos dominantes en el Parque Estatal de la Sierra de Tabasco⁴¹

| Grupo | | Calificador | | Clase textural | |
|-------|---------|-------------|-------------|----------------|--------|
| Clave | Nombre | Clave | Nombre | Clave | Nombre |
| GL | Gleysol | hu | Húmico | 3 | Fina |
| | | mo | Mólico | 3 | Fina |
| | | vr | Vértico | 3 | Fina |
| LV | Luvisol | an | Andico | 3 | Fina |
| | | ca | Calcárico | 2 | Media |
| | | len | Endoléptico | 3 | Fina |
| | | hu | Húmico | 3 | Fina |

⁴¹ (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2009).



Mapa 6. Mapa Edafológico

2.5.1.6 VEGETACIÓN

2.5.1.6.1 VEGETACIÓN NATURAL

El Parque Estatal de la Sierra de Tabasco se encuentra dentro de la Provincia Biogeográfica "Golfo de México" (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 1997), su ubicación dentro de dos subprovincias fisiográficas diferentes y su clima, permitieron el asentamiento de diferentes tipos de vegetación, principalmente selvas.

Según datos de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, el inventario florístico del Parque consta de 905 especies pertenecientes a cuatro grupos botánicos diferentes: 9 especies y 6 familias de Bryophyta, 23 especies y 8 familias de Pteridophyta, una especie de Cycadophyta y 886 especies de Magnoliophyta; en este último grupo, 75 familias son dicotiledóneas y 18 familias monocotiledóneas, siendo 112 especies nuevos reportes para la Flora de Tabasco (Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental, 2007).

Sin embargo, esta región ha sufrido una alteración considerable en su flora y en su fauna desde los tiempos prehispánicos, que determinó una drástica disminución de su diversidad y de su productividad. Se calcula que la cobertura selvática original en el estado de Tabasco se ha reducido en un 90% hasta la fecha (Tudela, 1989). Las áreas cubiertas por vegetación primaria han quedado reducidas a pequeños fragmentos, muchos de ellos con un elevado nivel de aislamiento, dando lugar a zonas de vegetación secundaria, de uso agrícola o ganadero. Las comunidades de vegetación primaria presentes en el área de estudio son: selva alta perennifolia, selva mediana subperennifolia y selva baja subperennifolia (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006) (**Mapa 7**).

2.5.1.6.1.1 SELVA ALTA PERENNIFOLIA

Esta comunidad vegetal se caracteriza por poseer alta biodiversidad, tanto desde el punto de vista florístico, como de la fauna que encuentra en ella hábitat y refugio. Es una comunidad vegetal muy densa, estratificada y extraordinariamente variada, dominada por árboles con alturas que superan los 30m., y que en su mayoría conservan su follaje todo el año. En una hectárea de selva alta se pueden contar, en promedio, más de cien especies arbóreas, y de 300 a 400 toneladas de biomasa en peso seco (Tudela, 1989). Su distribución geográfica está restringida a las zonas tropicales, en un rango de altitud de los 0 a los 1000 msnm principalmente, y en climas cálido húmedo con lluvias abundantes en verano (Am) y cálido húmedo con lluvias todo el año (Af). Los suelos de la selva alta perennifolia son ricos en materia orgánica, con coloraciones oscuras o rojizas, con buen contenido de arcilla y pH ácido o cercano a la neutralidad.

Precisamente, son todas estas características las que hacen atractivo, aparentemente, el cambio de uso de suelo, de vegetación primaria a cultivos agrícolas. No obstante, la mayoría de los suelos presentes en las selvas tropicales no son adecuados para el desarrollo de agricultura perenne, lo que ha resultado en la utilización del sistema seminómada de agricultura conocido como roza-tumba-quema; en otras ocasiones la transformación en pastizales inducidos o cultivados para la cría de ganado. Otro motivo para el cambio de uso de suelo es la explotación forestal, la cual se centra en especies de madera preciosa con gran demanda comercial, como es el caso de la caoba (*Swietenia macrophylla*) y el cedro rojo (*Cedrela odorata* y *Cedrela mexicana*) (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006).

En todo caso, se debe considerar la preservación prioritaria de los relictos de vegetación bien conservados, debido a su vital importancia como bancos genéticos, entendiendo que éstos al ser fragmentados por la deforestación, pueden verse afectados en su composición natural, dependiendo de los centros de origen de las especies que los conforman.

Dentro del área de estudio, la selva alta perennifolia ha quedado restringida a pequeños fragmentos ubicados en zonas de laderas sumamente abruptas y de difícil acceso, específicamente en la Sierra Tapijulapa y Cerros de La Iglesia, Quemado y Chile, y también en la Sierra Poaná, en esta última área con alteraciones de integridad notables. Estos fragmentos, al encontrarse aislados entre sí, y con poca conectividad, han dado origen a un proceso de insularidad notable con consecuencias ecológicas consabidas (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006).

2.5.1.6.1.2 SELVA MEDIANA SUBPERENNIFOLIA

Estas comunidades vegetales presentan un estrato arbóreo que oscila entre los 15 y 20m de altura. El carácter subperennifolio es consecuencia de la presencia de especies caducifolias en una matriz perennifolia, como por ejemplo *Cecropia obtusifolia* y *Bursera simaruba*. Generalmente, la selva mediana se puede presentar bajo diferentes tipos climáticos, desde sitios con más de 1500 mm de precipitación hasta en zonas mucho más secas, a lo largo o cerca de cuerpos de agua como ríos o pantanos. Su composición florística está conformada por especies presentes en otras comunidades vegetales como selva alta perennifolia o selva baja caducifolia, aunque también pueden tener algunas especies características (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006).

Este tipo de selvas también han sido alteradas considerablemente en el área de estudio, siendo transformadas en pastizales, zonas de cultivo o plantaciones, hecho que ha reducido drásticamente su cobertura original. En cuanto a las actividades de explotación forestal, éstas se centran en especies útiles para la elaboración de objetos de artesanía, muebles y combustibles.

La selva mediana subperennifolia está presente al sur de la localidad de Tapijulapa, y en fase fragmentada en la Sierra Madrigal.

2.5.1.6.1.3 SELVA BAJA SUBPERENNIFOLIA

Se trata de selvas densas, cuyas especies presentan una altura de entre 3 y 15m. Son selvas propias de clima cálido y con presencia de especies arbóreas que pierden sus hojas en la época seca del año, durante un lapso aproximado de seis meses. Estas comunidades vegetales se desarrollan en fragmentos muy pequeños por debajo de los 800 msnm. El estrato arbustivo varía en dependencia de la densidad del estrato arbóreo. Las trepadoras y epífitas son escasas, y como especies características se pueden citar *Piscidia piscipula*, *Tabebuia rosea*, *Enterolobium cyclocarpum* y *Cordia dodecandra*, entre otras.

Esta comunidad vegetal se distribuye en el cerro Coconá, sur de la localidad de Teapa y sureste de la Sierra Tapijulapa. Los suelos donde se establece esta vegetación en la Sierra de Tabasco son someros y pedregosos, por esta razón, en las zonas que han sido sustituidas por agricultura, se cultivan mayormente el maíz, frijol, garbanzo, ajonjolí, así como algunos frutales. La explotación forestal es de escasa importancia debido al poco tamaño y forma de los troncos de los árboles (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006).

2.5.1.6.2 VEGETACIÓN SECUNDARIA

Esta categoría corresponde a aquellas comunidades vegetales que se establecen como fases sucesionales que ocurren posteriormente a que las formaciones primarias hayan sido perturbadas o modificadas, y que comúnmente son conocidas como "Acahuales". La composición vegetal, la estructura, la fisionomía y el funcionamiento de estas comunidades están en función de diferentes aspectos como: la fase sucesional en la que se encuentren, la intensidad, duración y extensión del impacto (natural o antrópico) que dio origen a la perturbación, las características residuales de la vegetación primaria, y el estado del medio físico como por ejemplo el relieve, el clima, la

hidrología, los suelos y la fauna asociada. Estos aspectos en su conjunto influyen determinadamente en la velocidad de regeneración de la vegetación (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006).

En el área de estudio, la vegetación secundaria se distribuye a manera de manchones en los valles intermontanos y como fases sucesionales dentro o alrededor de las selvas naturales (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006) (**Mapa 7**).

2.5.1.6.3 VEGETACIÓN CULTURAL

Los ecosistemas artificiales ocupan el resto de la superficie del área de estudio o alrededores, siendo los de mayor importancia la agricultura de plantaciones, la agricultura de temporal y los pastizales (inducidos y cultivados) (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006) (**Mapa 7**).

2.5.1.6.3.1 AGRICULTURA DE PLANTACIÓN

Históricamente una de las actividades que mayor importancia ha tenido en el estado de Tabasco es la agricultura de plantaciones, desde las primeras plantaciones prehispánicas de cacao hasta las modernas plantaciones de plátano. Cerca al área de estudio se encuentran plantaciones de caña de azúcar, las cuales se desarrollan en el Municipio de Tacotalpa, en las márgenes de la localidad y río del mismo nombre; y plantaciones de plátano, ubicadas al norte de la localidad de Teapa.

2.5.1.6.3.2 AGRICULTURA DE TEMPORAL

Los cultivos de esta categoría están sujetos a las condiciones climáticas y meteorológicas que se desarrollan en el estado. Los cultivos de frijol y maíz, como elementos básicos, son de distribución generalizada y en pequeñas superficies generalmente de autoconsumo. La calabaza y el chayote se utilizan en forma de policultivo en combinación con el maíz y el frijol (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006).

2.5.1.6.3.3 PASTIZALES

Estas comunidades vegetales están integradas principalmente por gramíneas y ciperáceas, y su presencia está en función del clima, condiciones del suelo y del disturbio ocasionado por la especie humana y animales domésticos. Son comunidades de amplia distribución.

Los pastizales inducidos (nativos) se producen naturalmente tras el desmonte de la vegetación primaria y quema del terreno. Los pastizales cultivados sustituyen también a la vegetación primaria en terrenos desmontados, con la diferencia de que éstos son seleccionados por el hombre, eligiendo aquellos con alto contenido alimenticio para el ganado, y ocupan terrenos perfectamente rotulados.

La importancia económica de estas comunidades vegetales, radica en que constituyen el medio natural más propicio para el aprovechamiento pecuario. Los pastizales son adecuados para la alimentación del ganado bovino y equino, y en menor medida para el ovino y caprino. El sobrepastoreo puede impedir el desarrollo adecuado de las especies más nutritivas, ocasionando que las especies oportunistas invadan el terreno. La presencia de estas últimas puede propiciar procesos erosivos severos, y daño al ganado debido a su alto contenido tóxico (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006).

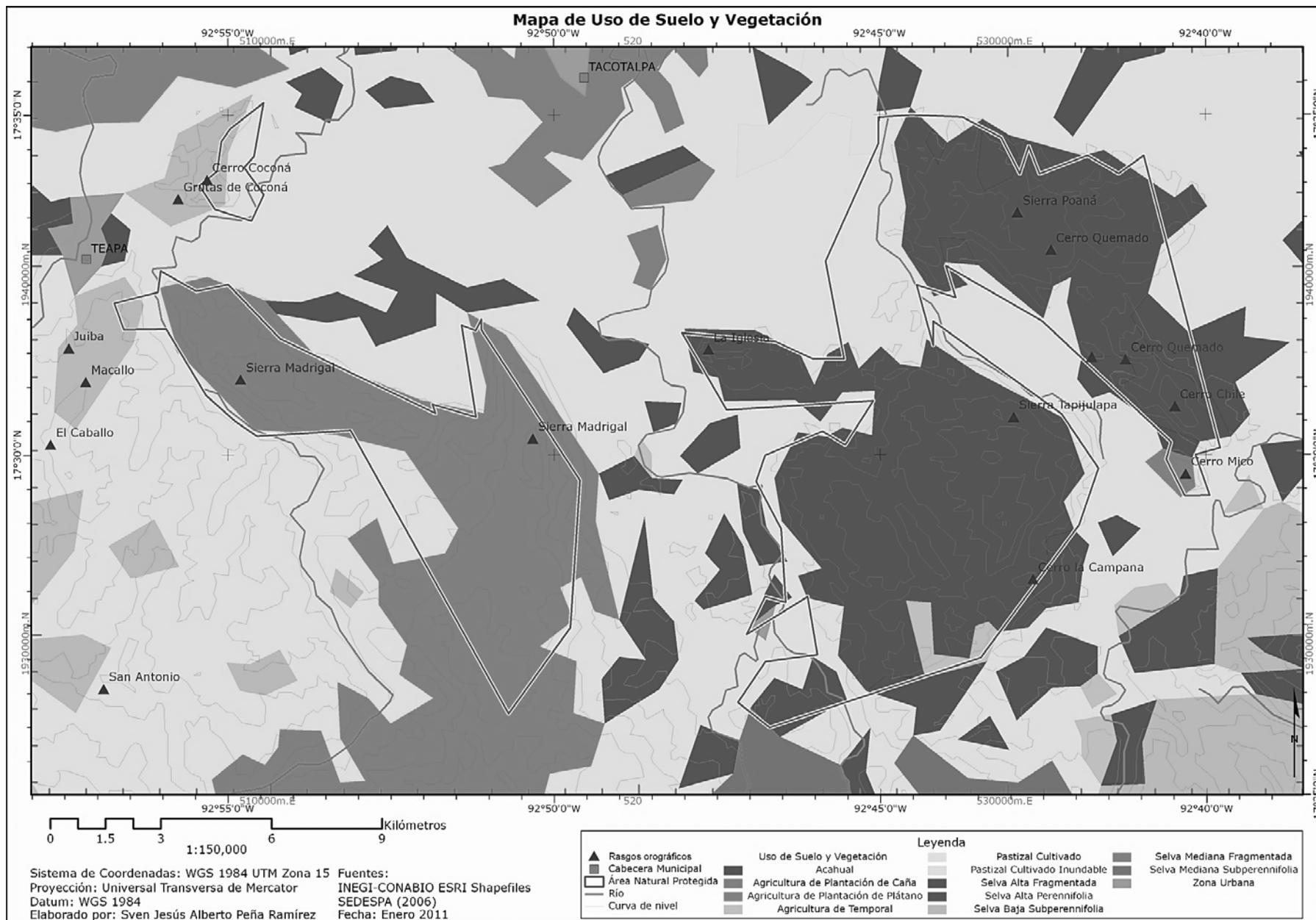
Los pastizales cultivados rodean casi en su totalidad al Parque Estatal de la Sierra de Tabasco y constituyen la matriz de las demás comunidades vegetales. Existe también una pequeña área de pastizal cultivado inundable al noroeste de la Sierra Poaná.

2.5.1.6.4 TIPOS DE VEGETACIÓN Y ESPECIES REPRESENTATIVAS

Tabla 4. Tipos de vegetación y especies representativas⁴²

| Tipo | Vegetación | | Especies representativas | |
|-----------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------|------------|
| | Comunidad vegetal o cultivo | Nombre científico | Nombre común | Utilidad |
| Vegetación Natural | Selva alta perennifolia | <i>Swietenia macrophylla</i> | Caoba | Madera |
| | | <i>Dialium guianense</i> | Guapaque | Comestible |
| | | <i>Ceiba</i> sp. | Ceiba | Madera |
| | | <i>Brosimum alicastrum</i> | Ramón, capomo | Comestible |
| | Selva mediana subperennifolia | <i>Bursera simaruba</i> | Palo mulato, chacá | Madera |
| | Selva baja subperennifolia | <i>Piscidia piscipula</i> | Jabín | Forraje |
| | | <i>Tabebuia rosea</i> | Palo de rosa | Madera |
| | | <i>Enterolobium cyclocarpum</i> | Piche | Madera |
| | | <i>Cordia dodecandra</i> | Siricote | Madera |
| | | <i>Syzygium jambos</i> | Pomarosa | Comestible |
| Vegetación Secundaria | Achual | Variables | | |
| Vegetación Cultural | Agricultura de Plantación | <i>Saccharum officinarum</i> | Caña de azúcar | Industrial |
| | | <i>Musa paradisiaca</i> | Plátano tabasco | Comestible |
| | Agricultura de Temporal | <i>Zea mays</i> | Maíz | Comestible |
| | | <i>Phaseolus vulgaris</i> | Frijol | Comestible |
| | Pastizales | <i>Cynodon plestostachyus</i> | Estrella africana | Forraje |
| | | <i>Digitaria decumbens</i> | Pangola | Forraje |
| | | Poaceae spp. | Pasto forrajero | Forraje |
| | | <i>Echinochloa polystachya</i> | Alemán, lehman | Forraje |
| | <i>Pennisetum purpureum</i> | Elefante o merkerón | Forraje | |

⁴² Modificado de (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2009).



2.5.1.7 FAUNA

La fauna tabasqueña, tanto terrestre como acuática y semiacuática, es muy diversa y numerosa, un ejemplo es que el 23% de la biodiversidad nacional de vertebrados se encuentra en esta entidad (García Gómez, 2005). Dentro del área de estudio y zona de influencia se pueden distinguir dos asociaciones faunísticas: Selva Lluviosa y Acahual (Gobierno del Estado de Tabasco, 2007).

2.5.1.7.1 ASOCIACIÓN DE SELVA LLUVIOSA

Dentro de esta asociación se encuentra el mayor número de especies animales de Tabasco; en ella dominan las aves, insectos, mamíferos, reptiles y peces.

Entre las aves se pueden encontrar tucanes, guacamayas, papagayos, colibríes, loros, perdices y pavos de monte, paloma perdiz, ceniztonle y guaco; los insectos más representativos son las abejas, avispas, mariposas y hormigas; el lagarto basilisco, la iguana, el garrobo y serpientes como la boa, masacuá, nauyaca y corales son reptiles presentes en ésta asociación; y finalmente, dentro del grupo de los mamíferos se pueden encontrar jaguar, mono zaraguato y ocelote. Sin embargo, el número de individuos de estas especies (principalmente aves, reptiles y mamíferos) ha disminuido considerablemente debido a la deforestación.

Corresponden a esta asociación faunística la selva alta perennifolia y las selvas mediana y baja sub perennifolias.

2.5.1.7.2 ASOCIACIÓN DE ACAHUAL

A consecuencia del deterioro de las selvas tropicales, y por ende del hábitat de la fauna, ésta ha tenido que permanecer en áreas de vegetación secundaria, abundante en arbustos, hierbas y pasto. Es así, que en el Acahual se pueden encontrar ardillas, conejos silvestres, topes, hispídos de bolsillo, ratones, rata cosechera, rata algodонера, palomas, pichones, chachalacas y pavo ocelado. En algunas ocasiones pueden encontrarse monos arañas, zaraguatos, mapaches, ardillas, codornices, osos hormigueros, venados, armadillos, jabalíes, puercoespines, tepezcuintles y conejos silvestres. También existen, en menor cantidad, animales carnívoros como el jaguar, ocelote, morgay y jaguarundi.

2.5.1.7.3 ASOCIACIONES FAUNÍSTICAS Y ESPECIES REPRESENTATIVAS

Tabla 5. Asociaciones faunísticas y especies representativas

| Asociación faunística | Especies representativas | |
|-----------------------|---------------------------------|----------------|
| | Nombre científico | Nombre común |
| Selva Lluviosa | <i>Herpetotheres cachinnans</i> | Guaco |
| | <i>Mimus polyglottos</i> | Cenzontle |
| | <i>Phoromachrus</i> | Quetzal |
| | <i>Ctenosaura similis</i> | Garrobo |
| | <i>Bothrops atrox</i> | Nauyaca |
| | <i>Panthera onca</i> | Jaguar |
| | <i>Leopardus pardalis</i> | Ocelote |
| | <i>Alouatta sp.</i> | Mono aullador |
| Acahual | <i>Ortalis vetula</i> | Chachalaca |
| | <i>Procyon lotor</i> | Mapache |
| | <i>Puma yagouaroundi</i> | Jaguarundi |
| | Vermilingua gr. | Oso hormiguero |
| | Erethizontidae spp. | Puercoespín |

2.5.2 CARACTERÍSTICAS SOCIOECONÓMICAS Y CULTURALES

Las características socioeconómicas y culturales de los municipios de Teapa y Tacotalpa ejercen influencia directa sobre el Parque Estatal de la Sierra de Tabasco, esto debido a la localización geográfica de esta ANP y a su carácter de jurisdicción estatal.

Ambos municipios tienen una extensión territorial de 1418.3Km², en la cual se distribuyen 57 ejidos, cuyos 538.64Km² de área registrada en 2007, incluyen superficie parcelada y no parcelada, superficies de uso común y asentamientos humanos (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2009).

2.5.2.1 PERFIL SOCIODEMOGRÁFICO

En el año 2005 la población total de los municipios de Teapa y Tacotalpa sumaban los 92,095 habitantes (4.62% respecto a la población total del estado), siendo los mayores núcleos poblacionales las localidades de Teapa, Tacotalpa, Tapijulapa, Xicoténcatl y Oxolotán. La población es mayormente rural (que urbana) y su esperanza de vida era de 75 años en el 2000. La población rural, distribuida en el Parque y su zona de influencia, incluye el grupo étnico Chol, el cual tiene una representatividad del 16% respecto al total de población indígena del estado de Tabasco, ocupando el segundo puesto en cuanto a cantidad, después del Chontal (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2009).

La pobreza alimentaria para el 2005 afectaba al 25.4% de la población en Teapa y 51% en Tacotalpa (respecto a la población total de cada municipio). El grado de marginación de la mayoría de las localidades del Municipio de Tacotalpa va de medio a alto (Gobierno Municipal de Tacotalpa, 2010).

En general para el estado de Tabasco, en el año 2000, el índice de alfabetización era de 0.903; y el grado de desarrollo humano era considerado medio alto (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2009).

2.5.2.2 INFRAESTRUCTURA SOCIAL Y COMUNICACIONES

Ambos municipios cuentan con la infraestructura necesaria para la impartición de educación primaria, secundaria, media superior y superior (Instituto Tecnológico Superior de la Región Sierra y Centro Regional Universitario del Sureste de la Universidad Autónoma Chapingo), también con centros de educación especial; sumando un total de 296 centros escolares. La infraestructura médica está constituida por 56 unidades médicas que incluyen unidades de consulta externa, hospitales, unidades de seguridad social y asistencia, centros de salud comunitarios, unidades de móviles de salud y unidades de medicina privada. Se cuenta con 77 centros de abasto, integrados por mercados públicos, centros receptores de productos básicos, tianguis y tiendas Diconsa (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2009); 2 unidades deportivas municipales; 20851 viviendas y 2 Oficialía del Registro Civil.

Los servicios públicos con que cuentan ambos municipios son: energía eléctrica, agua potable, alumbrado público, seguridad pública y tránsito, panteones, rastro público, mercados, calles pavimentadas, servicio de limpia, mantenimiento de drenaje, parques y jardines. La cobertura de estos servicios oscila entre 50 y 100% en ambos municipios, de acuerdo con informes oficiales. Los medios de comunicación locales se reducen a 2 semanarios, ambos publicados en el municipio de Teapa; a su vez ambos municipios cuentan con cobertura de televisión estatal, nacional y satelital. Se cuenta también con 66 oficinas de postales, 2 telégrafos, telefonía residencial, telefonía automática rural, telefonía pública, radio telefonía y telefonía celular; 2 estaciones de ferrocarril, 2 centrales camioneras, gasolineras y 5 aeródromos. Recientemente los centros

comunitarios digitales e-México han aumentado en número llegando a un total de 41, en ambos municipios.

Las vías de comunicación abarcan un total de 433.5 kilómetros de carreteras estatales, de los cuales 35 corresponden a carreteras federales pavimentadas, 113.2 a carreteras estatales pavimentadas y 285.3 a caminos rurales, esta red carretera cuenta con 78 puentes vehiculares, además ambos municipios son atravesados por la línea férrea Coatzacoalcos-Mérida, la cual es utilizada principalmente para el transporte de material mineral. Se puede arribar a Teapa por carretera, ferrocarril o río, y a Tacotalpa por carretera o ferrocarril. A Teapa se accede vía terrestre mediante la carretera federal 180 Villahermosa-Teapa, y al Parque Estatal de la Sierra de Tabasco a través de la carretera estatal Teapa-Tacotalpa y caminos secundarios (Secretaría de Gobernación, 2010).

2.5.2.3 ECONOMÍA

Los municipios de Teapa y Tacotalpa, junto con Jalapa integran la región económica de la Sierra, dentro del estado de Tabasco (El Colegio de la Frontera Sur, 2007). Su mercado es principalmente local y nacional.

Considerando a todo el estado de Tabasco, en el año 2000, el Producto Interno Bruto (PIB) *per cápita* en dólares ajustados era de 4.960; y en 2007 el PIB por sector de actividad económica ocupaba los siguientes porcentajes: Minería 47.3%, Comercio 11.3%, Servicios inmobiliarios y de alquiler de bienes inmuebles e intangibles 7.7%, el resto 33.7% (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2009).

La población económicamente activa (PEA) en el año 2000 se repartía de la siguiente manera: el sector primario ocupaba un 36% en el Municipio de Teapa y 62% en Tacotalpa, el sector secundario 15% y 11%, y el sector terciario 49% y 27% respectivamente (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006).

2.5.2.3.1 SECTOR PRIMARIO

• AGRICULTURA

El Municipio de Teapa es el principal productor de Plátano. En el año agrícola 2008 produjo un total de 399,718 toneladas. Tacotalpa se concentra en la producción de granos básicos como el maíz grano y frijol (con 18,511 y 563 toneladas de producción, respectivamente, en el año 2008) y caña de azúcar. También se cultiva chile habanero, plátano, papaya, cacao y hule hevea (Gobierno Municipal de Tacotalpa, 2010).

• GANADERÍA

Esta actividad económica se practica de manera extensiva en ambos municipios. En 2008 el volumen de la producción de ganado y aves en pie era de 6,936 cabezas de ganado bovino, 993 gallináceas y 652 cabezas de ganado porcino. En el mismo año, el Municipio de Tacotalpa produjo un total de 21 toneladas de miel y una tonelada de cera en greña (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2009).

• PESCA

La actividad pesquera es en general de baja escala, y está destinada principalmente al autoconsumo. Sin embargo, Teapa se ha especializado en la producción de crías de Tilapia, las cuales sumaron un total de 7'569,000 unidades de producción en 2008 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2009).

- **MINERÍA**

La actividad minera está representada por la explotación de minerales no metálicos como grava en Teapa; arena, grava y arcilla en Tacotalpa (Gobierno Municipal de Tacotalpa, 2010).

- **APROVECHAMIENTO FORESTAL**

El volumen de la producción forestal maderable de ambos municipios, según constancias emitidas en 2008, fué de 3,165 toneladas de especies preciosas (caoba y cedro rojo) y 1,246 toneladas de especies comunes tropicales, con un valor de 12'914,000 y 2'642,000 pesos, respectivamente (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2009).

Además, de la exuberante selva, se extraen flores de tanay, platanillo, pastor, bastón de rey o antorcha, tulipán silvestre, orquídeas, heliconias, framboyanes, macuillies, guayacanes y lluvias de estrellas, así como frutales exóticos como el huapaque, carambola, marañón, maracuyá, uspi, pío, jagua, cabeza negra, caimito, jujo, guanábana, pomarrosa y chirimoya (Gobierno Municipal de Tacotalpa, 2010).

2.5.2.3.2 SECTOR SECUNDARIO

Este sector económico está representado por graveras, el ingenio azucarero "Dos Patrias", fábricas de empaques de cartón y microindustrias dedicadas a la fabricación de embutidos y muebles de madera, y a la industrialización de lácteos y del plátano (Secretaría de Gobernación, 2010).

2.5.2.3.3 SECTOR TERCIARIO

Además de los servicios citados en el apartado de infraestructura social y de comunicaciones, los municipios de Teapa y Tacotalpa cuentan con autotransporte federal y estatal de carga y pasajeros, servicio de taxis, 7 sucursales de la banca comercial y oficinas de gobierno (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2009). El comercio al por menor se concentra en áreas como la alimentación, vestido, calzado, hospedaje, amueblado, medicinas, construcción y transporte.

- **TURISMO**

Debido al potencial turístico de ambas demarcaciones se tiene una especialización en los servicios de alojamiento temporal, preparación de alimentos y esparcimiento. En 2008 ambos municipios contaban con 24 establecimientos de hospedaje registrados y 33 establecimientos de preparación y servicio de alimentos y bebidas; Teapa contaba con 1 agencia de viajes y 6 balnearios (primer lugar del estado en el rubro) (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2009), además de un mirador donde se puede observar una panorámica del Río Teapa (Secretaría de Gobernación, 2010).

Son característicos de la región los cerros, selvas tropicales, ríos y aguas sulfurosas que albergan una gran diversidad faunística, así como una gran cantidad de cavernas, cuevas y grutas, lo que en conjunto constituye magníficos paisajes, cuyas variaciones geográficas (altitud, clima, vegetación e hidrología) enriquecen su calidad escénica (Gobierno del Estado de Tabasco, 2007). Estos paisajes, sumados a una infraestructura adecuada, potencializan los atractivos turísticos y ecoturísticos de la región.

Los municipios de Teapa y Tacotalpa son parte medular de la "Ruta Aventura en la Sierra" (Gobierno del Estado de Tabasco, 2007), y sus principales atractivos son:

• ATRACTIVOS NATURALES

Ambos municipios son ricos en atractivos naturales, siendo los más destacados: las cuevas de la Sardina Ciega en Villa Luz y San Felipe en Puxcatán, los balnearios naturales en los ríos Puyacatengo y Almandro, las cascadas y manantiales sulfurosos de Villa Luz, las grutas del Cerro Coconá, de las Canicas (en el poblado La Selva, en el pie de monte norte de la Sierra Madrigal), Villa Luz, Arroyo Chispa (poblado vecino de Villa Luz), Cuesta Chica (en el kilómetro 6 de la carretera Tapijulapa-Oxolotán) y El Polvorín (en Estación Poaná), Dos Cerros en el Ejido Poaná y Cerro El Madrigal (apto para el montañismo en la época seca) (Gobierno Municipal de Tacotalpa, 2010).

Se cuenta con dos centros ecoturísticos: Kolem Jaá y Kolem Chen en el ejido Arroyo Chispa. Además del centro recreativo "Hacienda & Spa Los Azufres" (A 5 kilómetros al oeste de Teapa, sobre la carretera federal 195), y dos jardines botánicos: el Jardín Botánico San Ramón en Teapa, el cual cuenta con una amplia colección de plantas en peligro de extinción; y el Jardín de Dios "Zunú" en Tacotalpa (en el Ejido Zunú y Pa-tastal) característico por la exposición de plantas medicinales (**Mapa 8**).

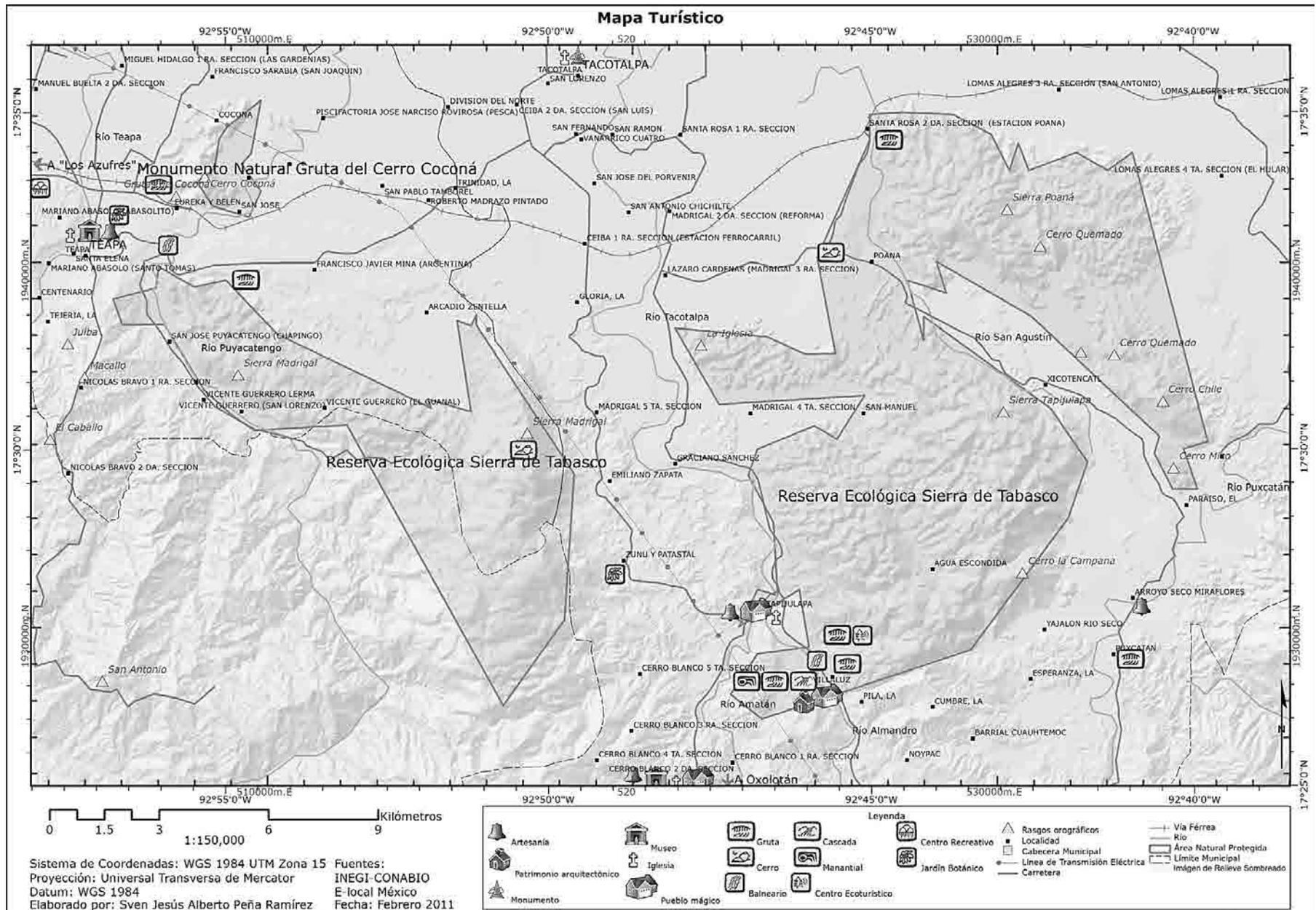
• ATRACTIVOS CULTURALES

Localidades estratégicas para el turismo son: Tapijulapa "lugar donde se rompen los cántaros", bello y pintoresco pueblo serrano, remodelado al estilo colonial mexicano (Secretaría de Gobernación, 2010), en donde se pueden realizar paseos en lancha y caminatas por sus angostas callejuelas de adoquines y elegantes casas blancas con techos de tejas rojas y balcones (Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental, 2007); Villa Luz, lugar místico- mágico de los zoques; y Oxolotán "casa del ocelote". Entre los atractivos históricos y arquitectónicos se pueden citar: La Parroquia de Tecomajiaca, los Templos de Esquipulas y Santiago Apóstol y el Museo de Antropología e Historia "José N. Correa Tosca" en Teapa; la Iglesia de Santiago Apóstol en Tapijulapa; la Casa del gobernador Tomás Garrido en Villa Luz; el Museo de la Sierra, el Templo y Ex Convento franciscano en Oxolotán; la Parroquia de Nuestra Señora de la Asunción y los Monumentos al coronel Lino Merino, a Benito Juárez y a la Madre en la ciudad de Tacotalpa (Secretaría de Gobernación, 2010).

Las artesanías están representadas por el "motusay" de Oxolotán (cestería hecha a base de bejucos de la región), muebles de bejuco en Tapijulapa, sombreros de palma de guano en Miraflores, el "Concurso de trajes artesanales" en Tapijulapa, talleres artesanales de mimbre (Gobierno Municipal de Tacotalpa, 2010), arcones, baúles y roperos de maderas preciosas en Teapa (Secretaría de Gobernación, 2010).

En cuanto a la riqueza gastronómica, son típicos de la región el "mone de cocha" (hecho a base de cerdo y hoja de momo), shotés en verde (caracoles con chipilín y plátano verde), tamales, dulces hechos a base de frutas de la región, bebidas regionales como el pozol, chorote y atol agrio, quesos y longaniza. Muestras gastronómicas son expuestas en tianguis de Villa Tapijulapa (Gobierno Municipal de Tacotalpa, 2010).

Las principales tradiciones de la región son: la danza de origen prehispánico "pesca de la sardina ciega" en las grutas de Villa Luz (celebrada en semana santa y dedicada a Chaac, Dios de la Lluvia), "la bajada del santo sepulcro" en Oxolotán y el "lavado de ropa de los santos" en Xicoténcatl (Gobierno Municipal de Tacotalpa, 2010). Entre las múltiples fiestas de la región, se citan las ferias "unidad y desarrollo, La Santa Cruz" y "unidad y desarrollo, La Asunción" en Teapa y Tacotalpa, celebradas en Mayo y Agosto, respectivamente (Gobierno del Estado de Tabasco, 2007). La riqueza literaria está representada por obras que incluyen los géneros de cuento y poesía. La música tradicional es ejecutada con marimba e instrumentos de viento, principalmente (**Mapa 8**).



Mapa 8. Mapa Turístico

2.5.3 IMPACTO AMBIENTAL Y CONSERVACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES

El estado de Tabasco se considera como espacio de libre elección, en donde 60% de la población obtiene sus ingresos y otros productos de la explotación de los recursos naturales, sin embargo, este aprovechamiento no ha sido del todo racional. La historia extractiva de la región ha citado desde la agricultura de plantaciones y el desarrollo de regiones agroindustriales, hasta la petrolización de la economía y la ganaderización, lo que ha dado origen a un deterioro ambiental notable, reflejado en la pérdida de la vegetación silvestre (principalmente selvas tropicales), disminución de fauna silvestre y fertilidad de suelos, erosión y contaminación, principalmente (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006).

Ante este escenario, fue creado en 1986 el Sistema de Áreas Naturales Protegidas del estado de Tabasco (SANPET), el cual comprende 11 áreas decretadas, de las cuales 10 son de carácter estatal (incluyendo el PEST) y una de carácter federal. Estas 11 representan el 13.1% de la superficie del estado (García Gómez, 2005). El área de estudio y zona de influencia, cubre totalmente el Parque Estatal de la Sierra de Tabasco, la Reserva Ecológica Villa Luz (parte del PEST) y el Monumento Natural Grutas del Cerro Coconá.

En particular, el Parque Estatal de la Sierra de Tabasco y el Monumento Natural Grutas del Cerro Coconá, se consideran áreas con uso de suelo compatible (en su mayor parte) con el potencial ecológico paisajístico, *fragilidad geosistémica*⁴³ de alta a muy alta, y *grado potencial de amenaza*⁴⁴ alto (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006).

En materia de conservación ambiental, el Gobierno del estado de Tabasco promueve la cultura de respeto al ambiente entre diversos sectores y grupos sociales, para fomentar la corresponsabilidad y la participación social (Gobierno del Estado de Tabasco. Secretaría de Planeación, 2009). Con el propósito de establecer guías formales de acción, las autoridades correspondientes (federales, estatales y municipales) se han dedicado a diseñar, elaborar y aplicar diferentes programas:

- **PROGRAMA SECTORIAL DE RECURSOS NATURALES Y PROTECCIÓN AMBIENTAL**

Este programa tiene como objetivo general el fomentar la política ambiental a través de los mecanismos e instrumentos necesarios para coadyuvar en el desarrollo sustentable de Tabasco (Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental, 2009). Siendo sus objetivos específicos:

- Fortalecer al sector recursos naturales y protección ambiental en los órdenes estatal y municipal.
- Establecer el Programa Estatal de Cambio Climático.
- Fomentar la Cultura Ambiental.
- Establecer el Programa para la conservación del Corredor Biológico Mesoamericano.
- Instrumentar el Programa de Ordenamiento Ecológico del Estado de Tabasco.
- Establecer el Programa Estatal de Servicios Ambientales.

⁴³ Susceptibilidad de los complejos naturales ante el impacto que pueden ocasionar tanto los procesos naturales como las diferentes acciones antropogénicas a las que pueden estar expuestos. Esta fragilidad está en íntima relación con las características intrínsecas (bióticas) y extrínsecas (abióticas) particulares de cada tipo de geosistema (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006).

⁴⁴ Presión que ejercen las diferentes actividades antropogénicas limítrofes con aquellos geocomplejos que aún se encuentran en estado natural o muy cercano al natural, y cuya expansión pueden ampliar el ámbito de fragmentación de los mismos o simplemente causar su paulatina degradación hasta llegar a su extinción total (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006).

Se pretende que los programas de desarrollo ambiental, estén dirigidos a preservar la biodiversidad existente en el territorio tabasqueño, y a aprovechar los recursos naturales de manera sustentable. Los objetivos específicos de estos programas son:

- Promover el desarrollo sustentable por medio del aprovechamiento racional de los recursos naturales.
- Promover la participación de la población en procesos de desarrollo sustentable.
- Consolidar el Sistema Estatal de Áreas Naturales Protegidas y zonas prioritarias.
- Coadyuvar en la promoción del turismo alternativo.

• **CORREDOR BIOLÓGICO MESOAMERICANO (CBM)**

Esta iniciativa constituye una visión integral de desarrollo para la región, promovida por los 10 países que integran el “Proyecto Mesoamérica” (antes Puebla-Panamá). Su objetivo es dar respuesta a la necesidad de conservar el patrimonio natural y cultural, reducir la vulnerabilidad social y ambiental, y mejorar la calidad y expectativas de vida de los habitantes de la región. Tras el estudio del territorio mexicano, la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) ha definido en 2009 áreas estratégicas en los municipios de Centla, Huimanguillo, Teapa, Tacotalpa y Tenosique, para su inclusión en el Corredor Biológico Mesoamericano (Gobierno del Estado de Tabasco. Secretaría de Planeación, 2009). Estas áreas estratégicas incluyen, entre otras, el Parque Estatal de la Sierra de Tabasco y el Monumento Natural Grutas del Cerro Coconá (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 2008). Con base en la clasificación de las nuevas áreas, añadidas al Corredor Biológico Mesoamericano, el área de estudio se encuentra dentro del Corredor Biológico de la Sierra (el cual comprende los municipios de Teapa, Tacotalpa y Macuspana) (**Figura 6**) (Gobierno del Estado de Tabasco. Secretaría de Planeación, 2009).

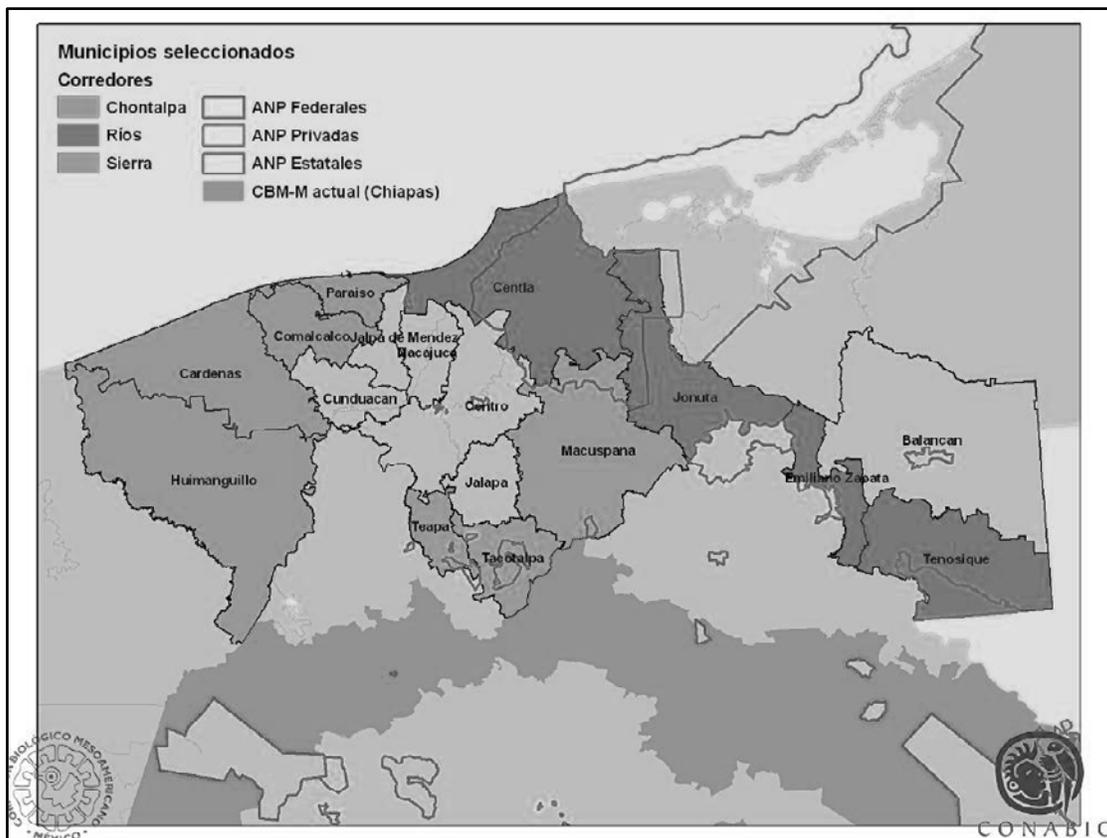


Figura 6. Municipios Seleccionados en Tabasco y Corredores Anexos al CBM
 (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 2008)

El Gobierno Estatal de Tabasco, en coordinación con la Dirección Ejecutiva del CBM, ha estado avanzado exitosamente en la integración de información y recursos que se aplicarán en acciones de sensibilización, capacitación y reconversión productiva, principalmente (Gobierno del Estado de Tabasco. Secretaría de Planeación, 2009).

• **PROGRAMA DE ORDENAMIENTO ECOLÓGICO DEL ESTADO DE TABASCO (POEET)**

Este proyecto fue financiado por la Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, y elaborado en 2006 por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. El trabajo final de este programa: “Modelo de Ordenamiento Ecológico del Estado de Tabasco” (MOEET) es el resultado del estudio y análisis de los sistemas natural, social y económico de Tabasco, realizado con base en fuentes oficiales de información y una metodología clara y precisa apoyada por sistemas de información geográfica. Se pretende que este modelo, en conjunto con los criterios ecológicos de las actividades preponderantes y las vocaciones del suelo de la entidad, permitan vincular e inducir políticas públicas y programas de gobierno, en el mismo sentido, para lograr el uso ordenado y equilibrado del territorio, el cual se traduzca en bienestar social, crecimiento económico y conservación de los recursos naturales del estado (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006).

Con base en el Modelo de Ordenamiento Ecológico del Estado de Tabasco y en relación con el área de estudio y zona de influencia (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006) (**Figura 7**):

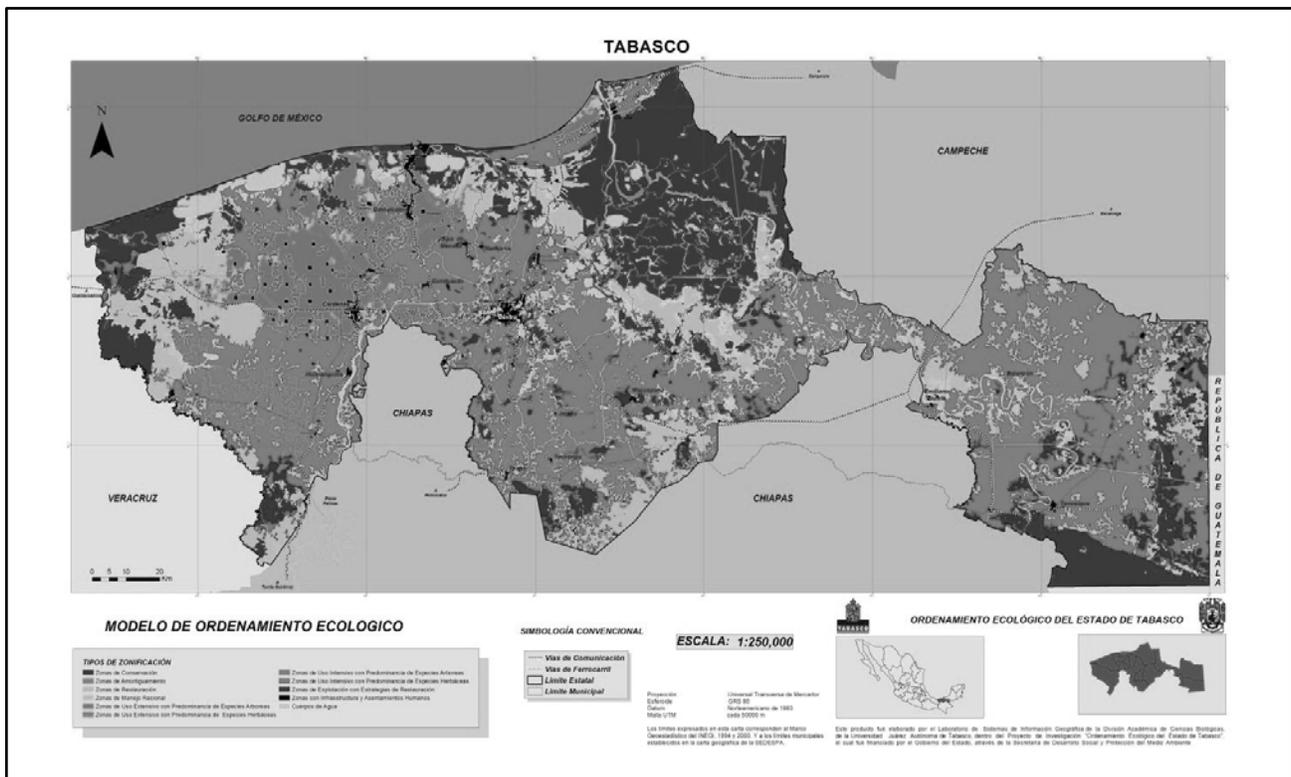


Figura 7. Modelo de Ordenamiento Ecológico del Estado de Tabasco
 (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006)

- Las áreas correspondientes a las Sierras Madrigal y Tapijulapa están categorizadas como *zonas de conservación*.
- Las áreas correspondientes a la Sierra Poaná y Cerro Coconá están categorizadas como *zonas de amortiguamiento*.

La vocación de uso de suelo, propuesta para estas categorías, se indica en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Vocación de Uso de Suelo (POEET)
 Reproducido de (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006)

| Vocación de Uso de Suelo | | | | | |
|--------------------------|--------------|--------------|---|--|---|
| Zonas | Política | Predominante | Condicionado | Compatible | Incompatible |
| Conservación | Conservación | Área Natural | Turismo Acuicultura Agricultura* Pecuario* | Forestal UMAs Apicultura Pesca de autoconsumo | Agricultura** Pecuario** Extracción de material Actividad petrolera Infraestructura Equipamiento urbano Asentamientos humanos |
| Amortiguamiento | Protección | Área Natural | Acuicultura Agricultura Actividad petrolera Equipamiento humano Extracción de material Infraestructura | Forestal UMAs Apicultura Pesca de autoconsumo Agricultura orgánica | Equipamiento urbano Asentamientos humanos |

*Áreas existentes
 **Nuevas áreas

• **PROYECTO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL COMUNITARIO**

La primera etapa de este proyecto agrupaba en el año 2009, 120 comunidades distribuidas en seis microrregiones del estado, con sedes en Cárdenas, Huimanguillo, Macuspana, Tacotalpa, Teapa y Tenosique. La participación de la población en el cumplimiento de la legislación correspondiente, ha contribuido ampliamente en la consolidación del ordenamiento ecológico territorial de Tabasco (Gobierno del Estado de Tabasco. Secretaría de Planeación, 2009).

• **PROYECTO RÍOS, LAGUNAS Y ARROYOS LIMPIOS**

Auspiciado por el Gobierno Municipal de Teapa y en coordinación con la Secretaría de turismo del estado, éste proyecto pretende concientizar a la comunidad a no arrojar desperdicios en cuerpos de agua, parques y jardines (Gobierno Municipal de Teapa, 2010).

• **PLAN MUNICIPAL DE DESARROLLO DE TACOTALPA 2010-2012**

El Gobierno Municipal de Tacotalpa, dentro de su Plan de Desarrollo 2010-2012, ha implementado medidas de reforestación, promoción de cursos y talleres de educación ambiental (Gobierno Municipal de Tacotalpa, 2010). Dentro de los ejes de desarrollo del plan, se contempla el fomento a la actividad empresarial y turística, en particular las acciones se centran en:

- Promover la actividad turística en todas sus modalidades aprovechando el patrimonio histórico, cultural y natural del municipio.
- Promover conjuntamente con los municipios vecinos los atractivos turísticos de forma integral para fomentar un corredor regional.

Además de estos programas, autoridades y locatarios trabajan en la aplicación adecuada de los planes de manejo de las diferentes Áreas Naturales Protegidas del Estado, así como en el seguimiento de programas específicos de conservación de la biodiversidad.

2.6 HIPÓTESIS

La caracterización geomorfológica y determinación taxonómica del relieve kárstico permitirá evaluar y corroborar la alta diversidad geológica expuesta en el paisaje kárstico del Parque Estatal de la Sierra de Tabasco, lo que aunado a la caracterización geográfica y evaluación de los valores de la geodiversidad, posibilitará estimar su importancia como patrimonio mundial, su valor y calidad escénica.

2.7 OBJETIVOS

2.7.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la diversidad geológica del paisaje kárstico en el Parque Estatal de la Sierra de Tabasco, y estimar su importancia como patrimonio mundial, su valor y calidad escénica.

2.7.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Caracterizar geográfica y geomorfológicamente el paisaje kárstico del PEST
- b) Realizar la determinación taxonómica del paisaje kárstico en el PEST
- c) Elaborar el mapa de distribución de los tipos de paisaje kárstico determinados, así como de sus caracteres diagnósticos.
- d) Evaluar la composición del paisaje kárstico en el PEST y su distribución geográfica.
- e) Identificar las áreas prioritarias de conservación kárstica del PEST, así como las figuras y estrategias óptimas para la específica conservación y aprovechamiento sustentable del paisaje kárstico, sus recursos naturales y servicios ambientales asociados. Destacando su importancia como patrimonio mundial, su valor y calidad escénica.

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 MATERIAL Y MÉTODO

3.1.1 MATERIAL

- **MAPAS IMPRESOS**

- Topográfico. INEGI. 2005. Escala 1:50,000 (E15-D21, E15-D22, E15-D31, E15-D32)

- **MAPAS DIGITALES**

- Carta Geológico-Minera. SGM. 2005. Escala: 1:250,000 Villahermosa (E15-8) (Raster)
- Altimétrico. INEGI. 2005. Escala 1:50,000 (E15-D21, E15-D22, E15-D31, E15-D32) (Vectorial)
- Varios. CONABIO. Escala Varias (Vectorial)
- Varios. INEGI. Escala 1:1'000,000 (Vectorial)

- **MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN**

- Con base en Mapa Digital Altimétrico. INEGI. 2005. Escala 1:50,000 (E15-D21, E15-D22, E15-D31, E15-D32) (Vectorial)
- Modelo Digital de Elevación LIDAR Tipo Terreno. INEGI. 2010. Resolución: 5m. (E15D21D2, E15D21D4, E15D21E3, E15D21E4, E15D21F1, E15D21F2, E15D21F3, E15D21F4, E15D22D3, E15D31B1, E15D31B2, E15D31B3, E15D31B4, E15D31C1, E15D31C2, E15D31C3, E15D31C4)

- **ORTOFOTO DIGITAL**

- INEGI. 2011. WMS (Web Map Server). Escala 1:20,000 (20k) (Resolución: 3m.) (B/N)
- INEGI. 2011. WMS (Web Map Server). Escala 1:10,000 (10k) (Resolución: 1m.) (Color)

- **SOFTWARE**

- Adobe Photoshop CS5 Extended Version 12.0 x64
- ArcGIS v.10
- PASW Statistics v.18
- PCI Geomatica Versión 10.0
- RockWorks 15 Complete, Revisión 2011.4.18

- **MATERIAL DE CAMPO**

- Bolsas de plástico
- Brújula tipo Brunton DQL-8 (17-651)
- Cámara fotográfica digital
- Cinta adhesiva
- Cinta métrica
- Clinómetro Brunton (112656) (Precisión de 1°)
- Encendedor
- Etiquetas
- GPS GARMIN MAP 60 (37840692)
- HCL al 10%
- Lupa Triplet 20x-21mm
- Navaja
- Papel pH Indicador Universal 0-14 (V-76)
- Periódico
- Pica
- Termómetro
- Velas



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

- **MATERIAL DE LABORATORIO**

- Moneda de cobre
- Clavo de acero
- Esclerómetro CONTROLS (o martillo Schmidt) Telex 333387 TEST I C181N5041M0d. dep.
- Recipiente graduado de plástico transparente de 1L
- Parafina
- Pinzas

3.1.2 MÉTODO (GENERALIDADES)

1. Diferenciación geomorfológica basada en la extracción y análisis de lineamientos (automática y por interpretación visual), morfometría y análisis de depresiones kársticas y colinas kársticas residuales.
2. Caracterización geomorfológica fundada en su homónima geográfica, marco teórico de la Geomorfología Kárstica Tropical, diferenciación geomorfológica, muestreo y verificación de campo, y análisis de laboratorio.
3. Determinación taxonómica del paisaje kárstico fundamentada en la teoría karstológica tropical.
4. Evaluación de la composición del paisaje kárstico en el PEST, identificación de áreas prioritarias de conservación kárstica, y estimación de los valores de la geodiversidad, con base en la teoría de la Geografía Ambiental, Ecología del Paisaje y Geodiversidad.
5. Identificación de figuras y estrategias óptimas para la específica conservación y aprovechamiento sustentable del paisaje kárstico, sus recursos naturales y servicios ambientales asociados.

3.2 GEOMORFOLOGÍA GENERAL Y REGIONAL DEL KARST EN EL PARQUE ESTATAL DE LA SIERRA DE TABASCO

3.2.1 GEOMORFOLOGÍA GENERAL DEL KARST

3.2.1.1 DEFINICIÓN E INTRODUCCIÓN AL KARST

La *Geomorfología kárstica* es la especialidad de la *Geomorfología*⁴⁵, que estudia las formas características de los paisajes en donde el *karst* es dominante.

La palabra *karst* es la acepción alemana del término *kras*, que comprende una región del oeste de Eslovenia, fronteriza con Italia, y en ella los terrenos calizos aparecen desprovistos de vegetación (Kranjc, (2004) 2008). Fue en esta área donde se realizaron las investigaciones pioneras en karst, por las escuelas de Geomorfología de Viena y por la publicación de Cvijic (1983) en la que se definen, de manera clara y simple, gran parte de las formas kársticas⁴⁶ (Ford, y otros, 2007).

El karst puede ser definido como terrenos con una hidrología y geomorfología distintiva, la cual surge de una combinación de rocas muy solubles (como caliza, mármol y yeso) con una porosidad secundaria bien desarrollada. Tales áreas son caracterizadas por ríos ciegos, cuevas, depresiones cerradas, afloramientos rocosos estriados y grandes manantiales (Ford, y otros, 2007). Estos paisajes se encuentran ampliamente distribuidos en el área continental (cerca del 20%), incluyendo México (**Figura 8**) (véase 2.2), y cerca del 25% de la población mundial depende de los acuíferos asociados al karst.

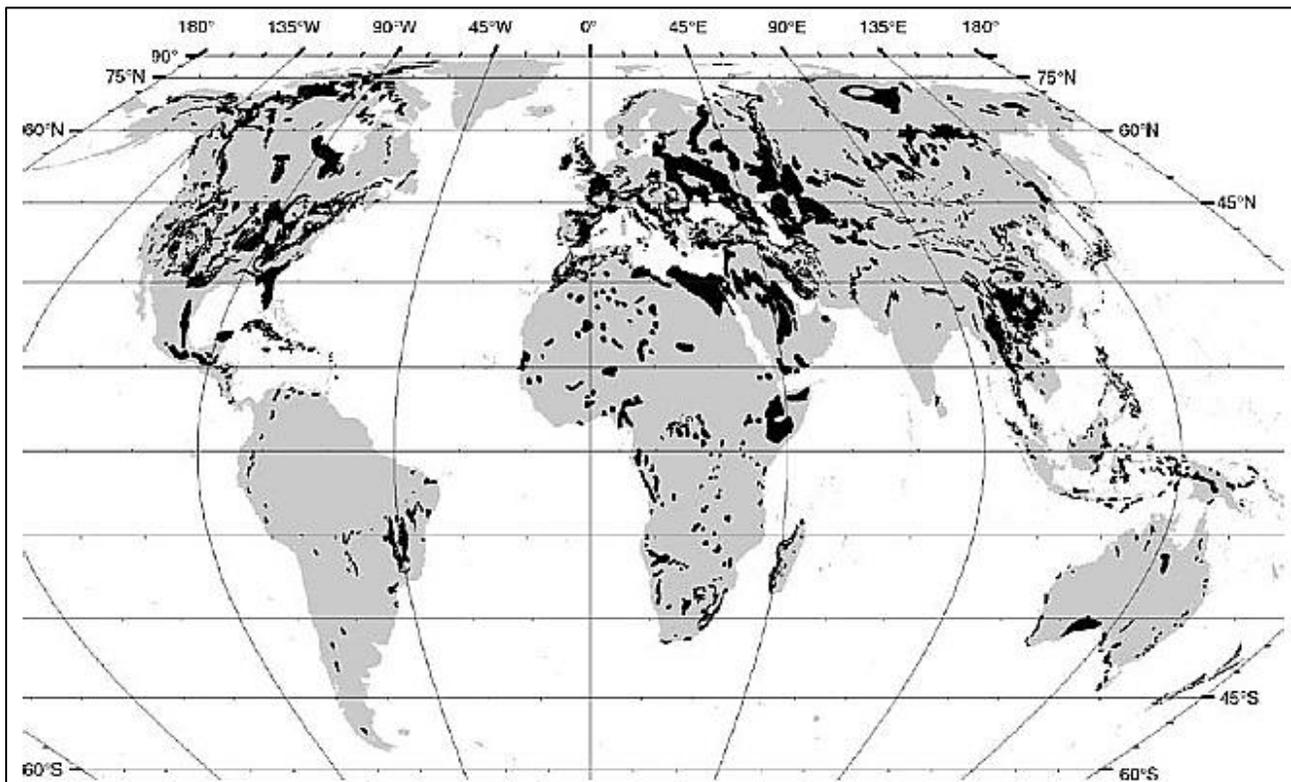


Figura 8. Distribución mundial de los principales afloramientos de rocas carbonatadas (Ford, y otros, 2007)

⁴⁵ Ciencia geológico-geográfica que estudia el relieve terrestre: su estructura, origen, historia de desarrollo y dinámica actual (Lugo Hubp, 1989).

⁴⁶ A razón de esto, la mayoría de los términos utilizados en el karst son de raíz alemana.

Aunque la mayoría del karst se desarrolla en rocas carbonatadas, existen otro tipo de rocas que también desarrollan karst. Se trata de las formaciones originadas básicamente por evaporación (*evaporitas*), compuestas por minerales muy solubles en agua, como el yeso, y su *fase anhidra*⁴⁷ la anhidrita, y los cloruros (compuestos principalmente de halita). Estas formaciones afloran en porcentajes pequeños a nivel global, pero su velocidad de disolución es mucho mayor que la de los carbonatos, lo que se traduce en una rápida morfogénesis e importantes riesgos kársticos (Gutiérrez Elorza, 2008). Ejemplo de estas morfologías es el karst de halita en Mount Sedom, Mar Muerto (Israel), resultado de la perforación de *diapiros*⁴⁸ salinos.

Por otra parte, se han descrito morfologías tipo kársticas producidas por procesos distintos a la disolución, las cuales se engloban bajo el término *pseudokarst* (Halliday, (2004) 2008). Dentro del conjunto de formas pseudokársticas se encuentran los *regueros*⁴⁹ y cavidades en laderas de rocas graníticas, *espeleotemas*⁵⁰ silíceos, *tafonis*⁵¹, *gnammas*⁵², conductos superficiales, *vulcanokarst* (tubos, colapsos y estalactitas lávicas), y *termokarst*⁵³. Ejemplos de pseudokarst son las torres cónicas de arenisca "Bungle-Bungle" en el Parque Nacional Purnululu (Australia) (Dingwall, 2003), y las cavidades en cuarcitas, estudiadas en Minas Gerais (Brasil) por Corrêa Neto (2000) y en Sudáfrica y Mozambique por Martini (2000) (Gutiérrez Elorza, 2008).

3.2.1.2 EL SISTEMA KÁRSTICO

Son de gran importancia en el desarrollo kárstico la estructura rocosa y la litología: las rocas densas, masivas, puras y toscamente fracturadas desarrollan el mejor karst (Ford, y otros, 2007), especialmente cuando éstas presentan alta *porosidad secundaria*⁵⁴, precedida por una insignificante *porosidad primaria*⁵⁵ (<1%). Las formas características del karst superficial y subsuperficial son resultado de la disolución hídrica de la roca a través de grietas y fracturas en la estructura geológica⁵⁶, de manera que la evolución progresiva de la red de agua subterránea, alimentada (principalmente) a través de sitios de recarga superficial (e.g. depresiones cerradas y ríos ciegos), y el desarrollo de flujos turbulentos, están íntimamente relacionados con la evolución de las formas kársticas superficiales. La red de conductos subterráneos constituye en sí la porosidad terciaria en el karst (Ford, y otros, 2007).

Las características principales del sistema kárstico pueden ser divididas en dos zonas: de erosión y de depósito (**Figura 9**). La zona de erosión está representada por la red de remoción de las rocas kársticas, efecto de la disolución solamente o acompañada por procesos secundarios (e.g. colapso). En la zona de depósito, localizada principalmente en alta mar o en pisos marginales, son creadas las nuevas rocas kársticas. En la zona de erosión, la disolución, bajo el control principal de las aguas subterráneas, fluyendo a través de la estructura geológica, constituye la principal característica de diagnóstico del karst (Ford, y otros, 2007). La mayoría del

⁴⁷ Se dice de los cuerpos en cuya composición no entra el agua, o que han perdido la que tenían (Real Academia Española, 2011).

⁴⁸ Tipo de pliegues perforantes.

⁴⁹ Formas erosivas elementales, lineales, que se originan por la unión de escurrimientos de las aguas pluviales (Lugo Hubp, 1989).

⁵⁰ Concreciones originadas por la acumulación de carbonato de calcio en las laderas, techo y piso de formas kársticas subterráneas (Lugo Hubp, 1989).

⁵¹ Oquedades en paredes rocosas, decimétricas y a veces métricas (Gutiérrez Elorza, 2008).

⁵² Pequeñas depresiones cerradas desarrolladas en superficies de afloramientos rocosos horizontales o de débil inclinación (Gutiérrez Elorza, 2008).

⁵³ Fenómeno que consiste en un asentamiento del suelo y las rocas subyacentes, por el derretimiento del hielo subterráneo (Lugo Hubp, 1989).

⁵⁴ Porosidad por fracturamiento, resultado de procesos físicos y/o químicos posteriores al proceso de sedimentación, sólo rellenada por cemento.

⁵⁵ Porosidad intergranular (interpartícula) originada durante el proceso de sedimentación, y rellenada por cemento o matriz micrítica (< 4µm) (o vacía).

⁵⁶ El karst puede ser concebido como un sistema abierto compuesto por dos subsistemas íntimamente relacionados, el hidrológico y el geoquímico, los cuales operan sobre las rocas kársticas. Por tanto, las características kársticas exógenas y endógenas son producto de la interacción de procesos en estos subsistemas vinculados (Ford, 2007).

agua subterránea de los sistemas kársticos es de origen pluvial, de manera que la disolución ocurre principalmente en el lecho rocoso o cerca de éste, proceso que se manifiesta como formaciones kársticas de superficie.

Si bien la disolución es el proceso fundamental para el desarrollo del karst, los macizos constituidos por rocas solubles están sujetos además a la acción de factores extrínsecos, que participan de manera activa en su evolución, como por ejemplo, las condiciones climáticas y el intemperismo biótico. Por tanto, es recomendable que las investigaciones sobre el karst sean de carácter multidisciplinario, y el estudio del macizo kárstico obedezca a un análisis tridimensional con el fin de contemplar las relaciones existentes entre las morfologías superficiales y las subsuperficiales (Gutiérrez Elorza, 2008).

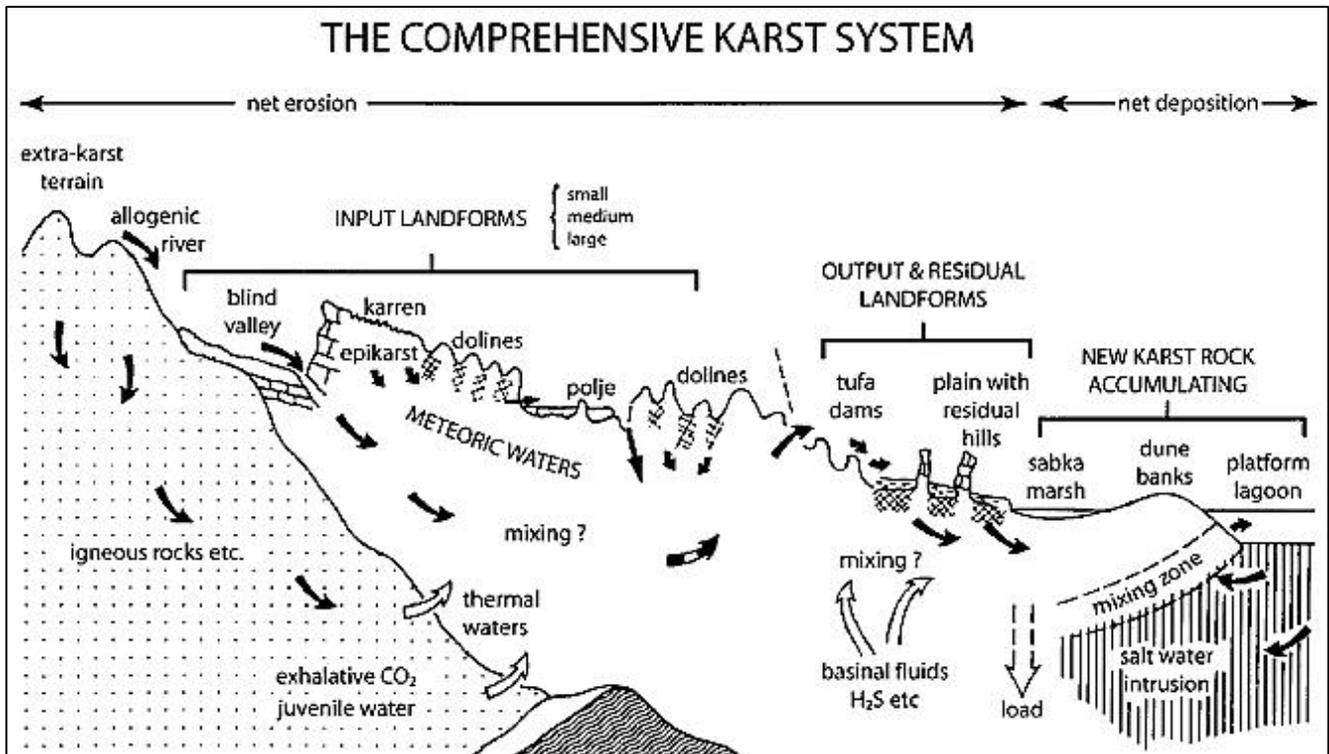


Figura 9. El sistema kárstico integral
 (Ford, y otros, 2007)

Considerando al karst como un sistema tridimensional, es posible señalar diferencias morfológicas dentro de éste, en función de distintas variables (cobertura, litología, tectónica, fisiografía, hidrología, etc.) (Quinlan, (1967) 2008) (Figura 9). En cuanto a magnitud espacial (diámetro en planta) se pueden reconocer formas de *pequeña escala* (<10 m), de *escala media* (de 10 a 1000 m), y de *gran escala* (>1000 m), o también *mayores* y *menores* (tamaño en general); en cuanto a su posición, se distinguen el *exokarst*, formas kársticas desarrolladas en superficie, el *endokarst*, morfologías kársticas subsuperficiales⁵⁷, y el *cryptokarst*, desarrollado bajo un manto de sedimentos permeables, tales como el suelo, depósitos periglaciares y arcillas residuales (Ford, y otros, 2007), y dentro de estos tres, las formas de precipitación o acumulación y erosión o denudación (*constructivas* y *destructivas*) (Pedraza Gilsanz, 1996).

En el marco del sistema kárstico, la mayoría de las formas del relieve pueden tener un papel de *entrada*, de *transición* o de *salida*, e.g., el *karren*, que está definido por superficies rocosas de calizas aflorantes, cinceladas por pequeños surcos o agujeros; y *dolinas*, depresiones cerradas, de

⁵⁷ Generalmente subdivididas en *hiperkarst*, resultado de la disolución subterránea a partir de agua de origen pluvial, e *hipokarst*, disolución por aguas termales (Figura 9).

forma circular o elipsoidal en planta, de metros a un kilómetro de diámetro y con profundidades de pocos metros a más de cien metros; ambos como elementos de entrada; poljes, grandes depresiones cerradas, como elementos de transición; presas de travertino o toba, y colinas residuales, como elementos de salida. En sentido estratigráfico se pueden distinguir el *karst desnudo*, en zonas desprovistas de suelo y vegetación; el *karst cubierto*, formaciones karstificables situadas por debajo de una cubierta de material, constituida por lo general de sedimentos sueltos; el *karst interestratal*, situado entre dos formaciones no karstificables; y el *karst exhumado*, afloramientos de rocas karstificables resultado de la erosión del material de cobertera (Gutiérrez Elorza, 2008). En sentido temporal se diferencian el *paleokarst*, karst sepultado por rocas consolidadas; el *karst relicto*, relieve kárstico superficial, apartado del ambiente que le dio origen, ya sea en sentido horizontal o vertical, como es el caso de las colinas residuales situadas por encima del nivel freático, o los túneles fluviales abandonados, muy frecuentes en sistemas de cavernas con múltiples niveles; y el *karst activo*, en contacto con el sistema hidrológico actual.

Otras clasificaciones contemplan el *karst barré* (cruzado), formas kársticas aisladas por rocas impermeables, el *karst de contacto*, desarrollado a lo largo de un contacto geológico y sobre el estrato soluble, y el *fluviokarst*, paisaje kárstico que resulta de la disolución y la erosión mecánica provocada por el paso del agua corriente (Ford, y otros, 2007), también se caracteriza porque es atravesado por ríos alógenos y compartimenta el macizo kárstico (Cvijic, (1924b) 2008).

3.2.1.3 LAS ROCAS KÁRSTICAS

Éstas se encuentran representadas por *rocas carbonatadas* (calizas y dolomías); *sulfatos* (yeso, anhidrita y epsomita); *haluros* (halita, silvina y carnalita); rocas sedimentarias detríticas con cemento carbonático o sulfatado (areniscas y conglomerados calcáreos); y rocas metamórficas carbonáticas, fundamentalmente mármoles (Pedraza Gilsanz, 1996). Las rocas carbonatadas contienen >50% en peso de minerales de carbonato. De acuerdo con la pureza en su composición mineral, se identifican dos principales rocas carbonatadas: *caliza* (compuesta por calcita o aragonito) y *dolomía* (dolomita) (Figura 10).

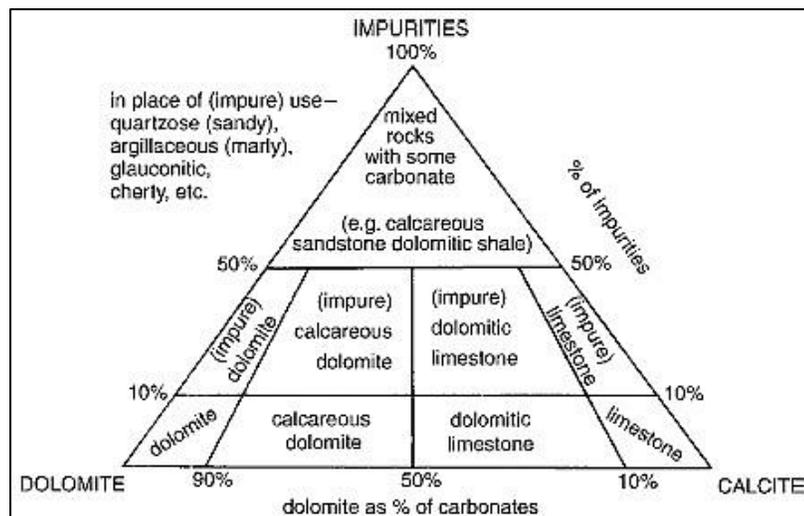


Figura 10. Clasificación de las rocas carbonatadas (Leighton, y otros, (1962) 2007)

Estas rocas se distinguen de otras, porque su acumulación depende en gran medida de la actividad orgánica, además de que son más propensas a alteraciones post-deposicionales. Las rocas carbonatadas, preservadas en los continentes, son principalmente depósitos de plataforma de mares someros (<30 m de profundidad). Las proporciones de calcita/dolomita en estas rocas, son de 80:1 en estratos del Cretácico, 3:1 en rocas del Paleozoico inferior, ~1:3 en el Proterozoico, y ~1:1 en el Arqueozoico (Ford, y otros, 2007).

En la **Tabla 7** se describen algunas características importantes de los principales minerales kársticos.

Tabla 7. Propiedades de los principales minerales kársticos

| Grupo químico | Mineral | Fórmula química | Peso específico | Dureza | Densidad (g/cm^3) | Color de la raya | Forma | Color | Brillo |
|---------------|------------|---------------------------------|-----------------|--------|-----------------------|------------------|--|---|-------------------|
| Carbonatos | Calcita | $CaCO_3$ | 2.71 | 3 | 2.6-2.8 | Blanca | Romboedros, escalenoedros, concreciones y agregados granulares, masivos y terrosos | Incoloro, blanco, amarillo, pardo, azul o negro | Vítreo |
| | Aragonito | $CaCO_3$ | 2.95 | 3.5-4 | 2.95 | Blanca | Prismas pseudo hexagonales y aciculares, agregados fibrosos, radiales y en estalactitas | Blanco, amarillo, rosa pálido | Vítreo o mate |
| | Dolomita | $CaMg(CO_3)_2$ | 2.85 | 3.5-4 | 2.85-2.95 | Blanca | Cristales regulares como romboedros o prismas, agregados masivos, granulares, oolíticos | Blanco, gris, rojizo y pardusco | Vítreo o nacarado |
| | Magnesita | $MgCO_3$ | 3.0-3.2 | 3.5-5 | 3.0-3.2 | Blanca | Romboedros o prismas hexagonales | Blanco | Vítreo |
| Sulfatos | Anhidrita | $CaSO_4$ | 2.9-3.0 | 3-3.5 | 2.9-3 | Blanca | Tablillas, prismas o agregados granulares, fibrosos y pseudomorfos | Gris o azulado | Vítreo o nacarado |
| | Yeso | $CaSO_4 - 2H_2O$ | 2.32 | 2 | 2.3-4 | Blanca | Tablillas, cristales prismáticos y agujas, agregados fibrosos, rosetas o cristales en placas | Incoloro, blanco, gris, amarillo, pardo, azul | Vítreo o nacarado |
| | Polihalita | $K_2Ca_2Mg(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$ | 2.78 | 3-3.5 | 2.77 | Blanca | Sistema triclinico | Incoloro, gris, rosa, blanco | Vítreo |
| Haluros | Halita | $NaCl$ | 2.16 | 2.5 | 2.1-2.2 | Blanca | Hexaedros, octaedros o agregados granulares o fibrosos, costras o estalactitas | Blanco grisáceo, rosado, azulado, violeta o naranja | Vítreo o graso |
| | Silvina | KCl | 1.99 | 2 | 2 | Blanca | Cúbico | Blanco, azulado, parduzco, rojizo, amarillento | Vítreo o graso |
| | Carnalita | $KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$ | 1.6 | 1 | 1.6 | Blanca | Ortorrómico | Incoloro en estado puro, azul, rojo, blanco, amarillo | Vítreo |
| Silicatos | Cuarzo | SiO_2 | 2.65 | 7 | 2.65 | Blanca | Regulares como prismas, bipiramidales, pseudocubos o agregados granulares masivos | Blanco, gris, pardo, violeta, verde, azulado, amarillo, rosa | Vítreo o graso |
| | Ópalo | SiO_2 | 2-2.25 | 5.5-6 | 2.65 | Blanca | Cristales, estructura aleatoria que va desde amorfa a cristobalita | Diferentes colores debido a los elementos traza, transparente u opaco | graso |

Así, entre las rocas carbonatadas, las calizas son las de mayor importancia en el desarrollo kárstico, esto debido a su alto contenido de carbonato de calcio ($CaCO_3$). Son precisamente las calizas y lutitas, las rocas que se describirán con mayor amplitud en la presente investigación, a razón de que éstas, en su conjunto, son el constituyente principal del macizo kárstico objeto de estudio (Islas Tenorio, y otros, 2005).

Los factores ambientales que actúan en la formación de depósitos calizos, determinan ampliamente su pureza, textura y espesor (entre otras propiedades litológicas). Aunque se conoce que algunos carbonatos de calcio se acumulan en muy diversos ambientes, la mayoría de las rocas calizas consolidadas fueron formadas en ambientes tropicales de mares someros, especialmente en plataformas y taludes. De manera que la gran diversidad de escenarios de depósito (**Figura 11**) sumada a las diferentes aportaciones de calcita o aragonito (orgánicas e inorgánicas), resulta en una amplia variabilidad de *facies*⁵⁸ calizas (**Figura 12**), lo que a su vez da lugar a innumerables variaciones sutiles en las características hidrogeológicas y geomorfológicas de la roca.

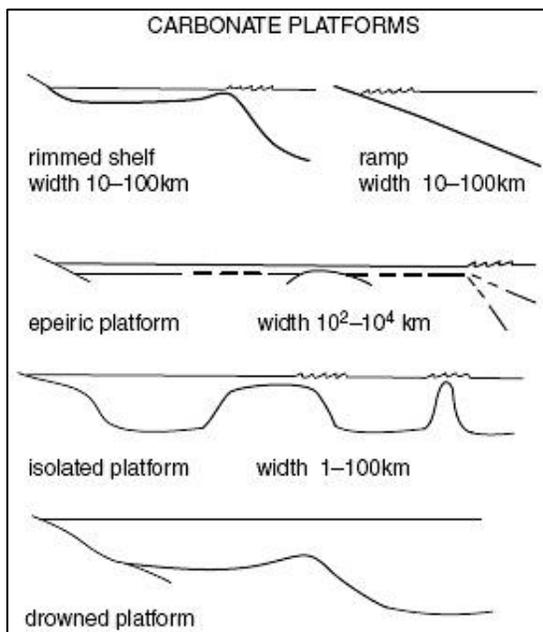


Figura 11. Tipos de plataformas carbonatadas

(Tucker, y otros, (1990) 2007)

- 1) Plataforma bordeada (ancho 10-100 Km)
- 2) Talud (ancho 10-100 Km)
- 3) *Plataforma epeirica*⁵⁹ (ancho 100-10000 Km)
- 4) Plataforma aislada (ancho 1-100 Km)
- 5) Plataforma ahogada

Como ya se ha mencionado, la mayoría del material original de las calizas es el aragonito o la calcita. Estos minerales son precipitados a partir de conchas y esqueletos de animales marinos o de tejidos de algas, medios que pueden aportar de 500 a 1000 gm²/año de material original en las plataformas marinas (Ford, y otros, 2007). Así, las incrustaciones vadosas de origen calcáreo pueden evolucionar a roca caliza tras su levantamiento sobre el nivel del mar. Los principales componentes de las calizas se enlistan en la **Tabla 8**.

Debido al origen orgánico de las rocas calizas, éstas contienen de 0.2 a ~1% de materia orgánica en su composición, además de algunas otras impurezas minerales que no superan el 0.1% del volumen total de la roca, e.g. ceniza volcánica. En caso de que las arcillas, arena y grava, depositadas en deltas y estuarios, superen la tasa de producción local de carbonato, se formarán lutitas calcáreas, areniscas, etc. (**Figura 10**).

Las calizas pertenecen al grupo de las rocas sedimentarias no clásticas, y se clasifican con base en el tamaño de grano, composición y facies percibidas. Las clasificaciones propuestas por Dunham (1962) y Folk (1962), posteriormente modificadas por varios autores, son las de mayor uso en la actualidad. En la propuesta de Dunham, modificada por Embry y Klovan (1971), se reconocen 10 tipos de textura original (**Figura 13**). La clasificación de Folk, modificada por Kendall (2006), se basa en la existencia de una matriz de micrita y/o un relleno de cementación de esparita, además de la descripción del tipo de grano, su origen, densidad y disposición en la roca (**Figura 14**). La **Figura 15** ilustra una pequeña muestra de la amplia gama de estructuras.

⁵⁸ Porción de una unidad litológica que posee un conjunto distintivo de características que la distingue de otras partes de la misma unidad (Tarbuck, y otros, 2005).

⁵⁹ Mares someros y extensos situados en las partes centrales de los continentes.

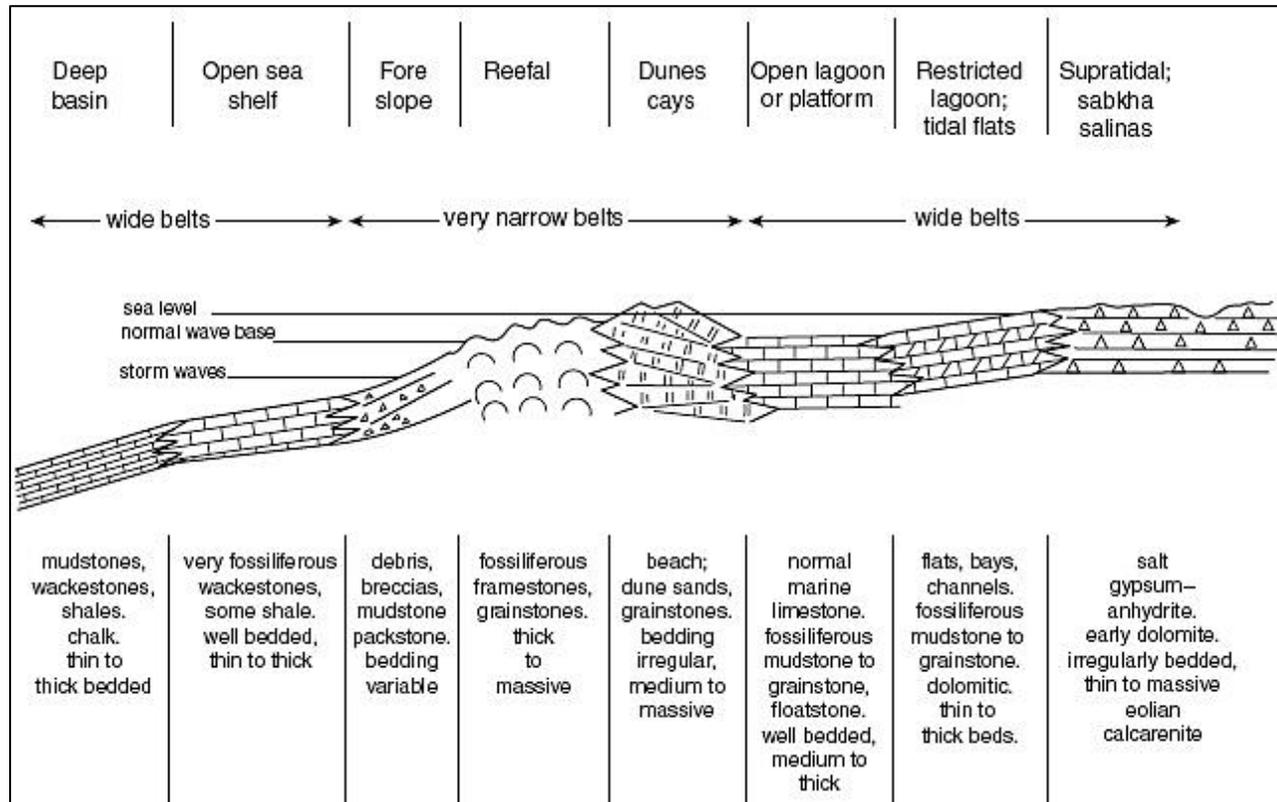


Figura 12. Modelo compuesto de facies para ilustrar el depósito de roca caliza (Ford, y otros, 2007)

Tabla 8. Principales componentes de la roca caliza
Modificado de (Ford, y otros, 2007)

| Tipo de textura | Descripción | Origen |
|-----------------|---|--|
| Micrita | Partículas de lodo calcáreo y limo de 0.5-5 µm de diámetro. Son el componente más grande en volumen en la mayoría de las calizas. | Arcilla y granos de limo marino |
| Peloides | Pelotillas fecales y <i>oolitos</i> ⁶⁰ microscópicos de 30-100 µm de diámetro. Son las partículas más importantes en volumen. | Cieno |
| Oolitos | Acumulaciones calcáreas esféricas del tamaño de la arena. | Granos de arena marina, esqueletos y estructuras de crecimiento. |
| Grumos | Peloides agrupados y Oolitos | |
| Oncolitos | Granos formados por algas agrupadas, mayores a 8 cm de diámetro. | |
| Esquelética | Corales, vertebrados, bivalvos, gasterópodos, etc. Tallos de algas y otras plantas depositados <i>in situ</i> o transportados. Fragmentos de todo género. | |
| Intraclastos | Fragmentos erosionados de sedimentos carbonatados parcialmente litificados, e.g. depósitos costeros. | |
| Litoclastos | Calizas consolidadas y otros fragmentos; a menudo alógenas. | |
| Estructuras | Arrecifes, montículos, <i>biohermos</i> ⁶¹ , <i>biostromos</i> ⁶² | |
| Limo vadoso | Sedimentos de carbonato intemperizados. | Formados durante la exposición de vados. |
| Pisolitos | Concreciones u oolitos grandes, e.g. costras de <i>caliche</i> ⁶³ | |
| Esparita | Cristales de calcita de tamaño mediano y grande que actúan como relleno de cementación; en bloque, fibrosos o a manera de donas. >20 µm de diámetro. | Cementos diagenéticos. |
| Microesparita | Granos de sustitución de micrita de 5-20 µm de diámetro. | |

⁶⁰ Pequeñas esferas calcáreas de origen sedimentario, poseen diámetros con dimensiones inferiores a 2 mm.

⁶¹ Arrecifes con forma de domo.

⁶² Masa de rocas construida por organismos.

⁶³ Depósito endurecido de carbonato de calcio, también llamado *calcreta*.

| Allochthonous limestones original components not organically bound during deposition | | | | | | Autochthonous limestones original components organi- cally bound during deposition | | | Depositional texture not recognizable |
|--|----------------------------------|--------------------|-----------------|--|--|--|--|--|---|
| Less than 10% > 2 mm components | | | | Greater than 10% > 2 mm components | | By organ- isms which act as baffles | By organ- isms which encrust and bind | By organ- isms which build a rigid frame- work | |
| Contains lime mud (<.03 mm) | | | No lime mud | | | | | | |
| Mud supported | | Grain supported | | Matrix sup- ported | > 2 mm com- ponent sup- ported | | | | |
| Less than 10% grains (>.03 mm < 2 mm) | Greater than 10% grains | | | | | | | | |
| Mud- stone | Wacke- stone | Pack- Stone | Grain- stone | Float- stone | Rud- stone | Baffle- stone | Bind- stone | Frame- stone | Crystalline |

Figura 13. Clasificación de rocas calizas según Dunham (1962) modificada por Embry y Klovan (1971) (Embry, y otros, (1971) 2007)

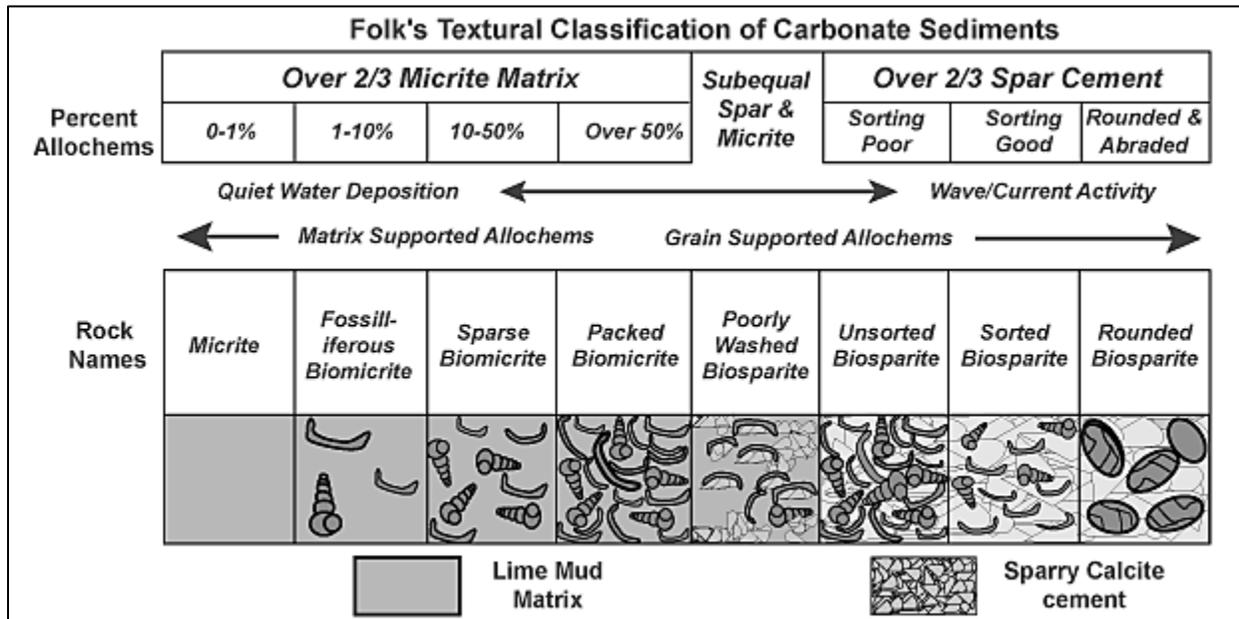


Figura 14. Clasificación de rocas calizas según Folk (1962) modificada por Kendall (2005) (Kendall, 2006)

La exposición de los depósitos carbonatados a deformaciones tectónicas y cambios en el nivel del mar, da origen a una estratificación secuencial de los mismos. En consecuencia muchas calizas y dolomías presentan un fuerte carácter cíclico en su estructura vertical, es decir, que las secuencias de facies pueden repetirse parcial o totalmente a lo largo de la columna estratigráfica (Figura 16). Este hecho puede conferir variaciones significativas en las propiedades litológicas e hidrogeológicas del karst a través de cada ciclo de acumulación. Es característico que al final de cada ciclo de acumulación se desarrollen planos de erosión con disolución superficial, calcretas y paleosuelos de arcilla fina. Tras su enterramiento estas superficies se convierten en *planos de estratificación*⁶⁴ o *disconformidades*. Por otra parte, el cese de la sedimentación o su ralentización

⁶⁴ Superficie en la que se unen dos capas o estratos de una roca estratificada.

en el fondo marino, posibilita la disolución y precipitación repetida de calcita, lo cual da origen a la litificación del fondo marino. Ambas disconformidades, planos de estratificación y fondos marinos litificados, ofrecen rutas de flujo preferencial en el desarrollo kárstico (Ford, y otros, 2007).

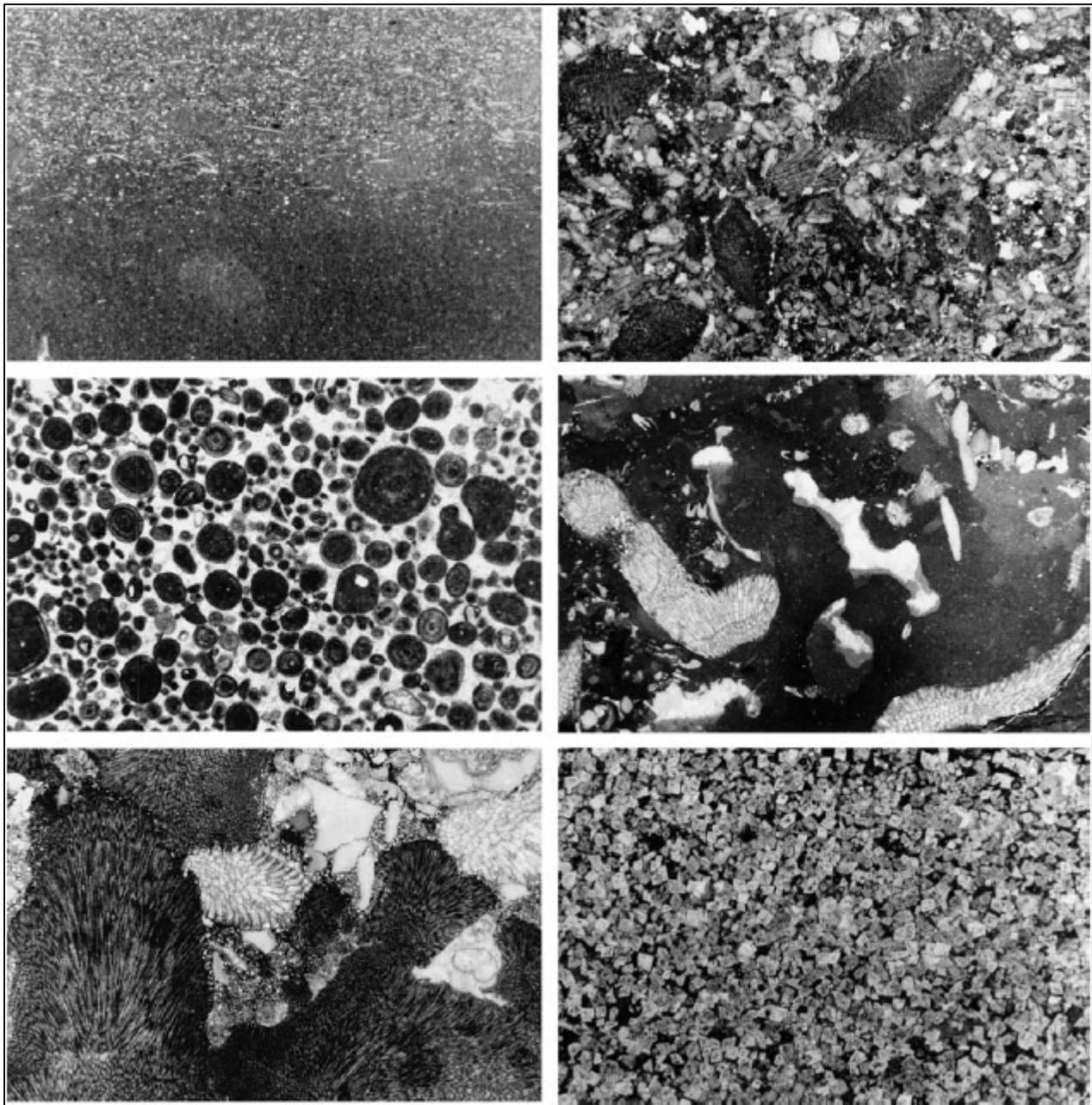


Figura 15. Cortes litológicos de calizas características y dolomía
 (Ford, y otros, 2007)

Superior izquierda. *Mudstone* (Dunham, 1962) o *micrita* (Folk, 1962) engrosada en la parte superior a *wackestone* micro bioclástica (Dunham) o *biomicrita* (Folk).

Superior derecha. *Packstone* fosilífera (Dunham) o *biomicrita* fosilífera (Folk), compuesta por foraminíferos, pelmatozoos y briozoos.

En medio izquierda. *Grainstone* de oolitos (Dunham) u *oosparita* (Folk).

En medio derecha. *Floatstone* de briozoos (Dunham).

Inferior izquierda. *Boundstone* coralina (Dunham) o *biolitita* (Folk)

Inferior derecha. *Dolomía* compuesta por cristales *euédrales*⁶⁵ casi completamente remplazados por caliza.

⁶⁵ Objetos bastante notables en la muestra.

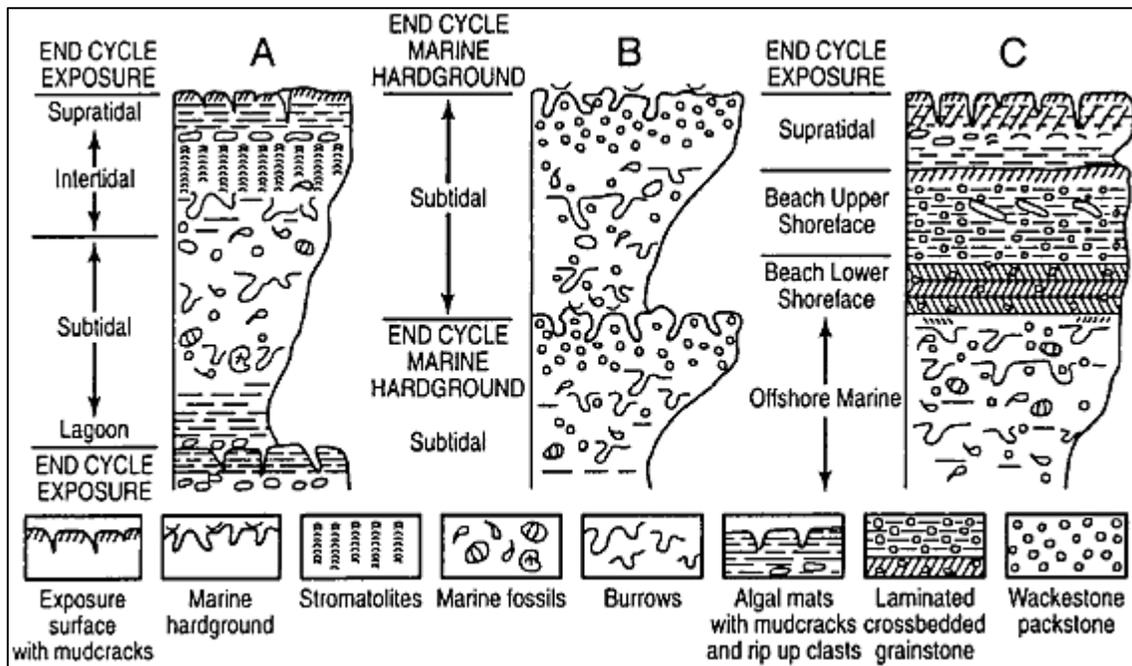


Figura 16. Modelos conceptuales de secuencias de depósitos carbonatados
 (Moore, (2001) 2007)

En superficie se reconocen tres tipos principales de depósitos carbonatados: *tufa*, depósitos granulosos formados por filamentos algales, tallos y raíces vegetales, encontrados en manantiales y márgenes fluviales o lacustres; *travertino*, calcita cristalizada a menudo dispuesta en capas, poco lustrosa y con escaso componente vegetal, depositada en cavernas o superficialmente en fuentes hidrotermales; y *marga*, carbonato de calcio y arcilla, depositados en proporciones casi iguales, en algunos lagos de agua dulce y en cuerpos de agua hipersalinos.

Las rocas calizas consolidadas tienen una porosidad que por lo general es menor a 5% (aunque algunas alcanzan más de 15%). Los principales procesos diagenéticos⁶⁶ en las calizas son la compactación, disolución, micritización microbiana, cementación de calcita, remplazamiento cristalino (neomorfismo) y dolomitización (Ford, y otros, 2007). La diagénesis puede tener lugar en depósitos marinos someros y profundos, ambientes vadosos o freáticos, y subsuperficialmente por la depositación subsecuente de sedimentos más jóvenes, por metamorfismo tectónico, termal o hidrotermal (Figura 17). La litificación de las calizas y dolomías puede llevarse a cabo por uno o más procesos diagenéticos, de manera que esta diversidad genética puede conferir características diferentes a las rocas consolidadas, y en consecuencia al karst.

Por su parte, la *lutita*, es una roca sedimentaria clástica compuesta por partículas del tamaño de la arcilla (<1/256 mm). Estas rocas detríticas de grano fino constituyen más de la mitad de todas las rocas sedimentarias (Tarbuck, y otros, 2005). Los ambientes de depósito más comunes en las lutitas son los lagos, llanuras de inundación de ríos, lagunas y cuencas oceánicas profundas. La diagénesis de estas rocas es mayormente por compactación y se realiza en ausencia de material cementante, lo que les atribuye un carácter débil. El tamaño tan fino de las partículas que las constituyen no permite la fácil circulación de las soluciones que contienen el material cementante, ésta es una razón del por qué estas rocas tienden a formar capas delgadas o láminas. Los colores blanco y verde son características de un ambiente de depósito ligeramente reductor mientras que las coloraciones rojas y amarillas representan un ambiente oxidante.

⁶⁶ La *diagénesis* es el proceso de formación de una roca a partir de sedimentos sueltos que sufren un proceso de compactación.

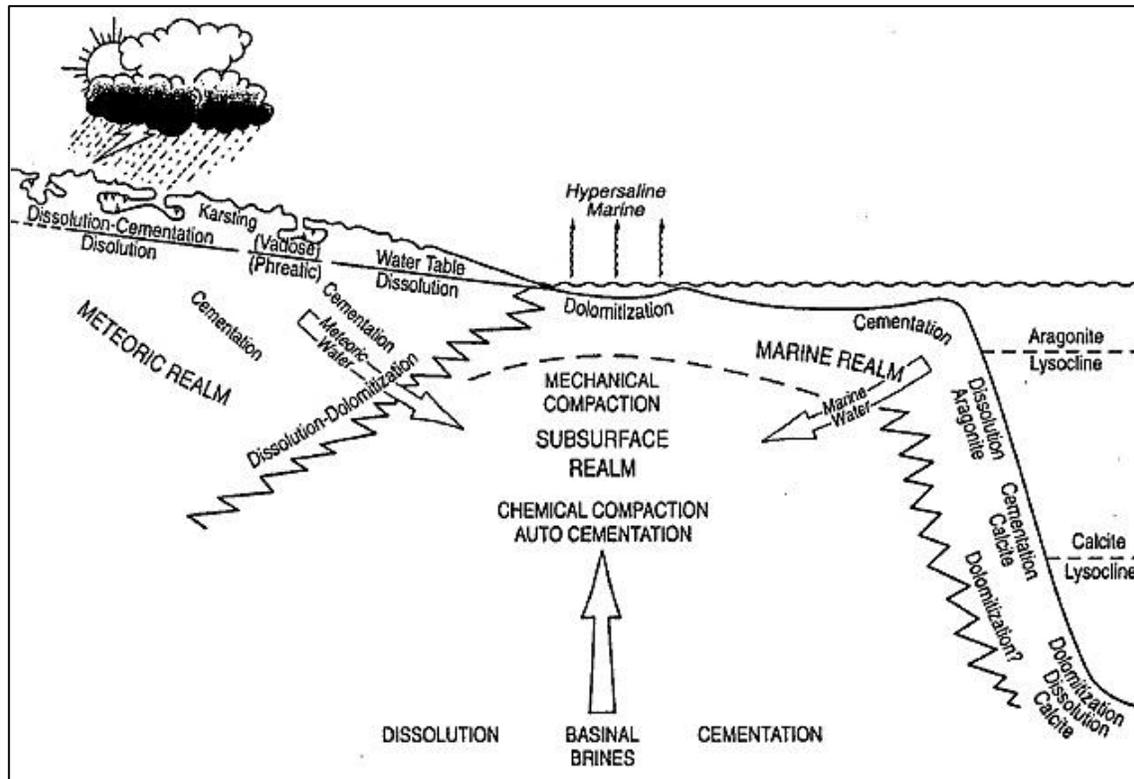


Figura 17. Principales ambientes diagenéticos, cementación de calcita y dolomitización (Moore, (2001) 2007)

3.2.1.4 EFECTO DE LAS PROPIEDADES LITOLÓGICAS EN EL DESARROLLO DEL KARST

Las características litológico-estructurales son factores que influyen en gran medida en la morfogénesis e hidrogeología kárstica. Estos factores, al actuar a distintas escalas, confieren propiedades distintivas a los diferentes tipos kársticos.

El mejor karst se desarrolla en rocas cuya pureza en carbonatos es $>70\%$ (Ford, y otros, 2007). James y Choquette (1984) sugieren que en orden de mayor a menor solubilidad se encuentran: las rocas compuestas por calcita ricas en magnesio, las rocas puras en aragonita, las compuestas por calcita pobres en magnesio, y finalmente, las constituidas por calcita y dolomita pura (Ford, y otros, 2007).

Las rocas compuestas por granos finos y textura rugosa tienden a ser las más solubles, a razón de que en éstas es mayor la superficie expuesta de las partículas. En varios estudios ha quedado evidenciado que las micritas y biomicritas son los componentes calizos más solubles (e.g. Sweeting and Sweeting, 1969; Maire, 1990) (Ford, y otros, 2007). Siendo la biomicrita el componente más soluble, debido a que en éste, los microfragmentos fósiles sobresalen en la superficie de la roca, incrementando su aspereza.

La *porosidad*, definida como el porcentaje del volumen total de roca o de sedimento formado por poros (Tarbuck, y otros, 2005), es un factor de suma importancia en el comportamiento erosivo de las rocas carbonatadas. Se consideran tres tipos de porosidad: *primaria*, todo tipo de porosidad formada durante la depositación de la roca; *secundaria*, por fractura o fisura; y *terciaria*, formada por canales o conductos. La (Figura 18) muestra un esquema de clasificación de la porosidad en rocas carbonatadas.

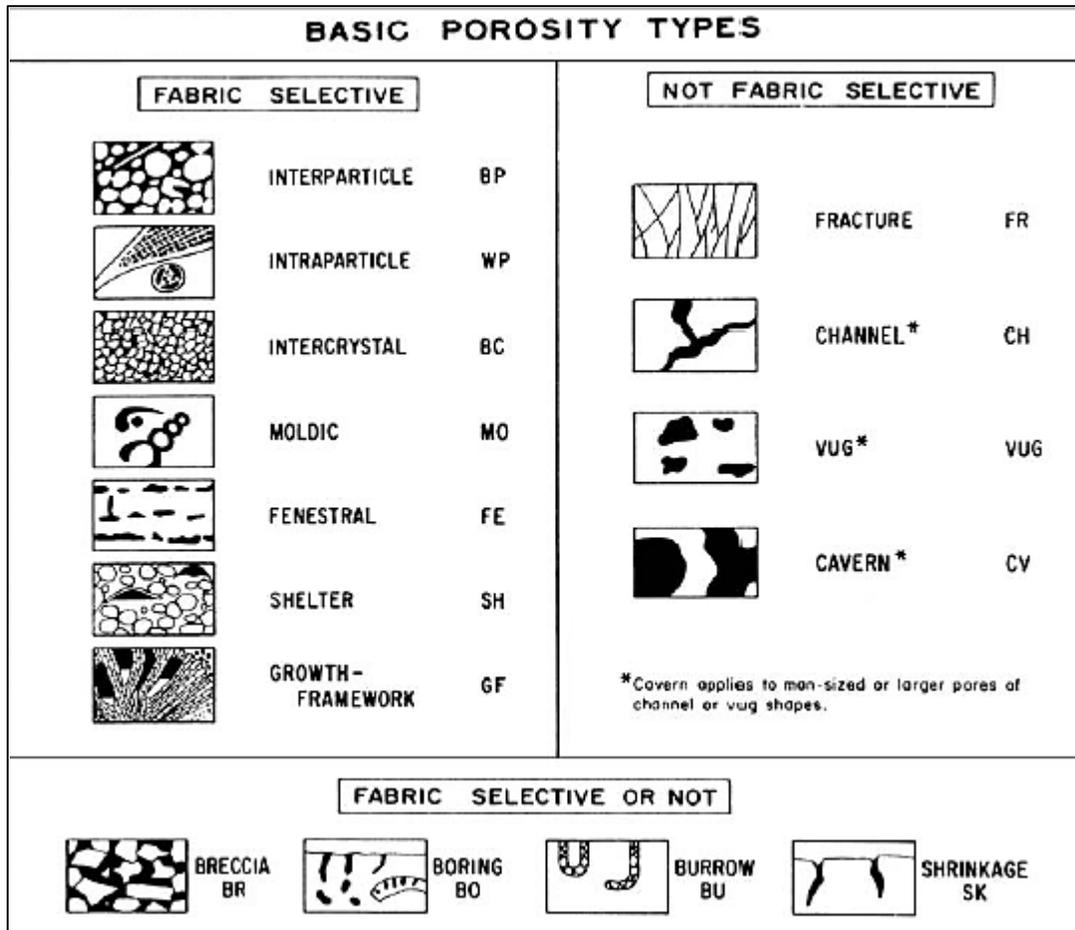


Figura 18. Clasificación de la porosidad en rocas carbonatadas (Choquette, y otros, (1970) 2007)

La hidrogeología y geomorfología kárstica consideran principalmente a la porosidad de gran escala, e.g. interconexiones, planos de estratificación y fracturas de infiltración, canales de disolución y cavernas (**Figura 18**) (Ford, y otros, 2007). Esto se debe a que el grado de presión hídrica alcanzado en el sistema kárstico, no es lo suficientemente fuerte como para hacer pasar cantidades significativas de fluido a través de la porosidad primaria de la roca. Esta última cobra importancia en la diagénesis superficial, y en particular (refiriéndonos al campo de interés de la presente investigación) en la caracterización de las calizas, donde la porosidad primaria se correlaciona positivamente con el tamaño de grano y la heterogeneidad textural. La porosidad primaria de la micrita es generalmente <2%, mientras que la de la esparita oscila entre 5 y 10% (Ford, y otros, 2007).

Respecto a la resistencia mecánica, a pequeña escala, la dureza de la roca es función de su estructura interpartícula; puede medirse en laboratorio mediante pruebas de compresión, corte o martilleo. A gran escala, la dureza de las rocas sedimentarias es función de la densidad de fisuras, tales como fracturas y planos de estratificación. La mayoría de las rocas carbonatadas son muy resistentes y pueden soportar acantilados y domos por largos periodos de tiempo, a menos que presenten una estratificación fina y altamente fisurada.

El martillo Schmidt es de gran utilidad para la determinación de dureza en muestras litológicas. Este instrumento fue diseñado originalmente para calcular la resistencia mecánica del concreto en una escala de 10-100. Estudios realizados en el Caribe, han calculado en 40-41 la *dureza Schmidt* en muestras de caliza dolomítica, y 34-35 en muestras de micrita y esparita

caliza. Se cree que existe una correlación positiva entre la dureza de las calizas y la aspereza topográfica (Day, (1983) 2007).

3.2.1.5 ROCAS CLÁSTICAS INTERESTRATALES

En ocasiones las formaciones geológicas presentan estratos de lutita, arenisca o carbón dispuestos entre los estratos carbonatados (Ford, y otros, 2007), como es el caso de la formación Angostura-Jolpabuchil (Islas Tenorio, y otros, 2005), en el PEST. Este grado de "impureza estratigráfica" en el macizo soluble puede generar alteraciones en el desarrollo kárstico, tanto favorables como desfavorables para la disolución. La penetración de agua en las rocas solubles, y por tanto, la disolución de éstas, es potencializada a través de los contactos litológicos entre rocas carbonatadas (e.g. caliza) y rocas detríticas (e.g. lutita). En contraste, la falta de interconexión hidrológica subterránea entre los estratos del macizo kárstico, puede restar continuidad al proceso de karstificación, lo cual es muy probable que se vea manifestado en el relieve.

3.2.1.6 PLANOS DE ESTRATIFICACIÓN, DIACLASAS, FALLAS Y TRAZOS DE FRACTURAMIENTO

Tomando en cuenta la información anterior, es indiscutible la importancia que tienen los planos de estratificación, diaclasas, fallas y fracturas como principales guías de desarrollo de la red hidrológica en el karst. En el sistema kárstico, este conjunto de rasgos morfológicos puede ser clasificado como discontinuidades de infiltración (Ford, y otros, 2007).

El espesor de los planos de estratificación⁶⁷ (o *contactos*) es tan variable como su potencial de infiltración hídrica. Los planos de estratificación con mayor potencial de infiltración, incluyen los que han servido como superficies de deslizamiento durante los eventos tectónicos, y aquellos con depósitos sustanciales, láminas de lutita y nódulos (como pisolitos y oolitos). En la **Tabla 9** se presenta una clasificación estándar de los planos de estratificación en relación a su espesor. La magnitud de área de los planos de estratificación crece en proporción de su espesor, de manera que, aquellas discontinuidades delgadas a muy delgadas cubren un área de pocos metros cuadrados; las de espesor medio a grueso se extienden entre $10^3 - 10^6$ m²; y las grandes, pueden representar formaciones completas y cubrir cientos de kilómetros (Ford, y otros, 2007). Los planos de estratificación, a través de los cuales tiene lugar la disolución kárstica, pueden ser considerados como entidades *continuas*, mientras que las fracturas y fallas son en general entidades *discretas*, debido a su corta distancia relativa. Finalmente, se reconoce que el mejor karst requiere una estratificación de mediana a masiva, ya que la estratificación fina no tiene la suficiente fuerza mecánica para mantener fuertes pendientes y amplias cavernas (Ford, y otros, 2007).

Tabla 9. Terminología para los planos de estratificación (espesor y ancho de diaclasa)
 Reproducido de (Ford, y otros, 2007)

| Espesor (cm) | Descripción | Ancho de diaclasa (cm) | Descripción |
|--------------|---------------------|------------------------|--------------|
| 100-1000 | Muy grueso o masivo | >300 | Muy ancha |
| 30-100 | Grueso | 100-300 | Ancha |
| 10-30 | Mediano | 30-100 | Mediana |
| 3-10 | Delgado | 5-30 | Estrecha |
| 1-3 | Muy delgado | <5 | Muy estrecha |
| <1 | Laminado | | |

Las *diaclasas* son grietas carentes de desplazamiento, que se originan en rocas parcialmente consolidadas. Las fracturas de corte implican un desplazamiento lateral o vertical <1 cm, se originan durante la diagénesis y son provocadas por esfuerzo tectónico de compresión o tensión.

⁶⁷ Las discontinuidades de poco espesor son utilizadas generalmente para subdividir las *formaciones* en *miembros* y *capas*.

En las rocas con estratificación regular, la mayoría de las diaclasas tienen una orientación normal a los planos de estratificación, aunque éstas también pueden estar inclinadas. En planta la mayoría de las diaclasas se ven rectas, aquellas diaclasas que presentan geometrías curvas se deben a la influencia de rocas arrecifales. Un sistema de diaclasas está constituido por conjuntos de diaclasas paralelas e intersectadas en ángulos regulares. Los sistemas rectangulares y de 60°/120° son los más comunes, y son causados por tensión simple o compresión, respectivamente. Las diaclasas principales o *diaclasas maestras* se extienden a través de varios estratos, alcanzando varios cientos de metros de longitud en rocas masivas (Ford, y otros, 2007). La **Tabla 9** muestra una escala del ancho en las diaclasas.

La evolución de diaclasas en rocas carbonatadas, ya sea en ensanchamiento o estrechamiento, por esfuerzos de tensión o compresión, es alterada por el proceso de karstificación, el cual puede causar su ralentización, aceleración o inversión, dependiendo de la intensidad disolutiva. Al igual que en la estratificación, el mejor karst se desarrolla en rocas donde las diaclasas son anchas o muy anchas, ya que esto asegura una mayor disolución (Ford, y otros, 2007).

Por su parte, las *fallas* son fracturas con desplazamiento vertical o lateral de los bloques, con longitudes máximas de varios kilómetros y 100–1000 Km, respectivamente (**Figura 19**). En las *fallas normales* los esfuerzos de tensión originan grietas, las cuales pueden ser llenadas por *brecha*⁶⁸ o calcita secundaria, entre otros sedimentos. Las *fallas inversas*, *laterales* y *transcurrentes*⁶⁹ se originan por esfuerzos de compresión, y en la mayoría no se forman grietas. Los planos de falla en los *cabalgamientos*⁷⁰ sirven de planos de estratificación. En bloques calcáreos, la escasa inclinación de los planos de falla en las cabalgaduras, así como las grandes áreas que cubren, son responsables de aumentar la capacidad de infiltración interestratal. Las fallas geológicas grandes por lo general presentan pequeñas fallas en ángulos agudos o paralelas a éstas, esto a consecuencia de la resistencia de la roca a los esfuerzos tectónicos aplicados.

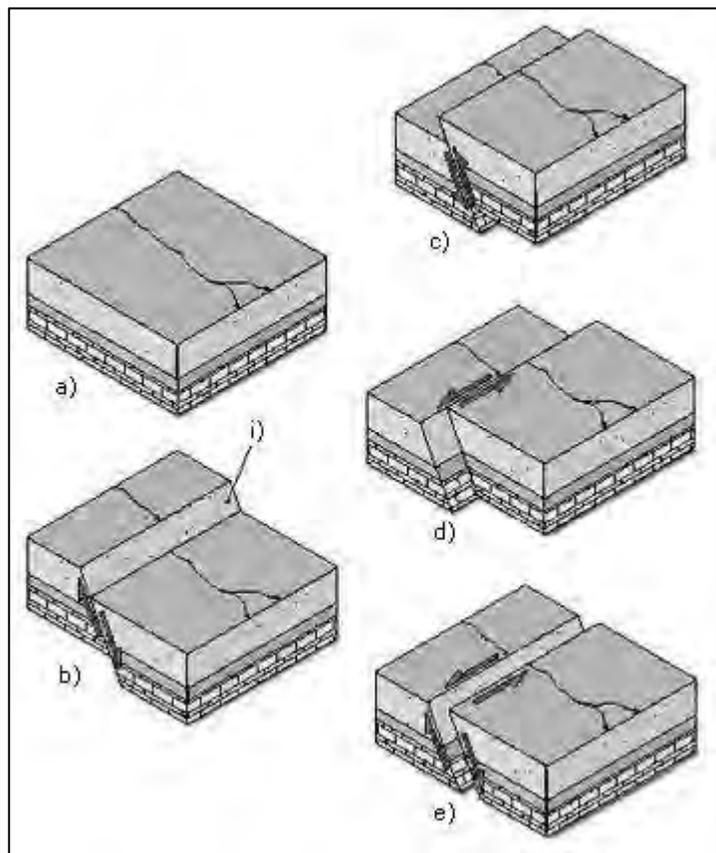


Figura 19. Principales tipos de fallas geológicas

Reproducido de (Advameg, Inc., 2011)

- a) Bloque antes del afallamiento.
- b) Falla normal.
- c) Falla inversa.
- d) Falla lateral izquierda.
- e) Falla normal con componente lateral.
- i) Plano de falla.

Los *trazos de fracturamiento* o *lineamientos* son estructuras geológicas o rasgos físico-geográficos de carácter regional, con orientación definida en línea recta o curva, de origen tectónico (generalmente debido a una falla *cortical*⁷¹) (Lugo Hubp, 1989). Estas fallas generalmente presentan un alto grado de inclinación y desplazamiento corto, además de fracturas

⁶⁸ Roca sedimentaria compuesta de fragmentos angulosos (Tarbuck, y otros, 2005).

⁶⁹ Fallas laterales de escala regional.

⁷⁰ Falla inversa de ángulo pequeño (Tarbuck, y otros, 2005).

⁷¹ Perteneciente o relativo a la corteza terrestre.

secundarias asociadas a ellas. La mayoría de los paisajes kársticos muestran lineamientos (**Figura 20**). Estudios alrededor del mundo, han demostrado que muchas de las depresiones kársticas mayores se orientan en función de los trazos de fracturamiento. Estas depresiones pueden localizarse en la intersección de dos trazos. También es conocido que el desarrollo de muchas cuevas está controlado por trazos de fracturamiento y planos de falla (**Figura 22**) (Ford, y otros, 2007).

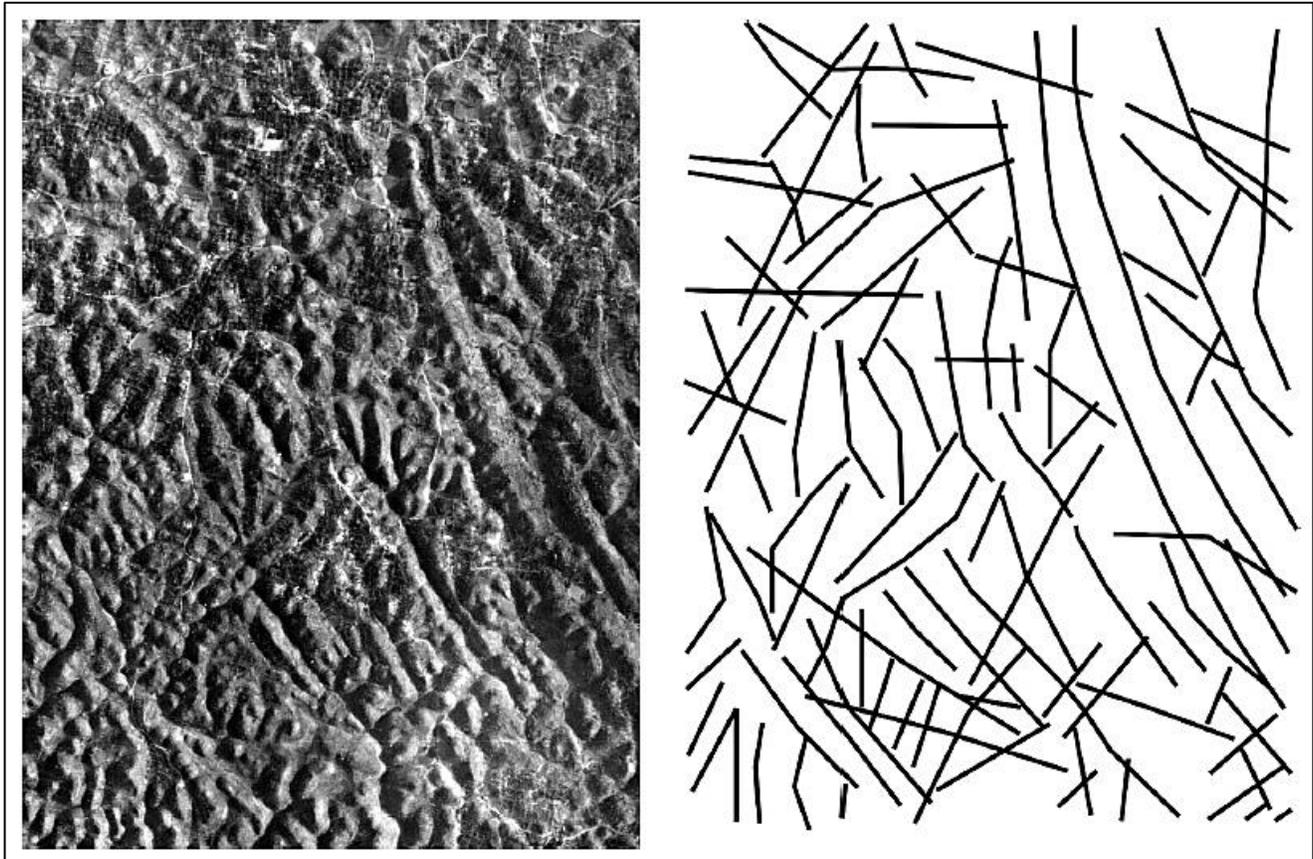


Figura 20. Reconocimiento de lineamientos en áreas kársticas
 (Haryono, y otros, 2004)

Izquierda. Fotografía aérea de karst laberíntico cónico en Gunung Kidul, Indonesia.
 Derecha. Lineamientos detectados en la fotografía.

Por naturaleza, la apertura de las fracturas es muy variable, sin embargo, con fines morfométricos, se considera a las fracturas como fisuras con muros paralelos separados por una distancia fija. La apertura mínima requerida para iniciar el proceso de karstificación es probablemente mayor a 10 μm (Ford, y otros, 2007).

3.2.1.7 ESTRUCTURAS PLEGADAS Y PAVIMENTOS KÁRSTICOS

Los paisajes kársticos se encuentran en todo tipo de estructuras geológicas, incluyendo llanura, meseta, *pliegue homoclinal*⁷², plegamientos simples o múltiples, domos, etc. (Ford, y otros, 2007). Estas estructuras pueden dar origen a diferentes tipos de karst, tanto en superficie como en profundidad.

El plegamiento de las rocas carbonatadas requiere deformación plástica, generalmente asociada a estratos diagenéticamente maduros del Cretácico o edades mayores. Plegamientos que

⁷² Estratos que se inclinan todos en la misma dirección y con el mismo ángulo.

pueden tener una amplitud de pocos centímetros a varios kilómetros. Las fuerzas de tensión tienden a crear conjuntos de diaclasas maestras, alineadas al eje de plegamiento (**Figura 21**), sobre crestas de *anticlinales* y canales de *sinclinales*. El deslizamiento diferencial de los planos de estratificación es más común en los flancos. Así, las redes de cavernas kársticas se extienden a través de uno o varios anticlinales y/o sinclinales, presentando conductos alargados condicionados por diaclasas maestras o narices en el caso de *plegamientos hundidos*⁷³ o con inmersión (**Figura 23**) (Ford, y otros, 2007). Estas estructuras pueden dar origen a diferentes tipos de pavimento kárstico (Williams, (1966) 1996) (**Figura 24**).



Figura 22. Conducto de disolución alterado por una falla geológica
 (Ford, y otros, 2007)

Como se puede observar, la falla se sitúa a lo largo del plano de estratificación que dio origen a la karstificación. Grotta del Frassino, Lombardía, Italia.



Figura 21. Elementos de los pliegues geológicos
 (Gutiérrez del Campo, 2010)

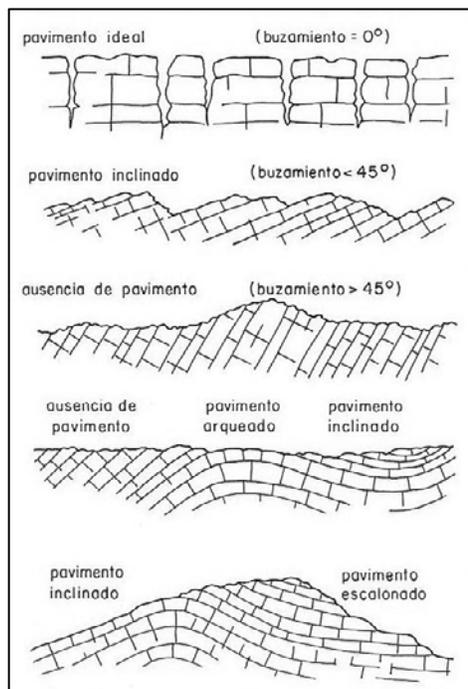


Figura 24. Pavimentos kársticos
 (Williams, (1966) 1996)

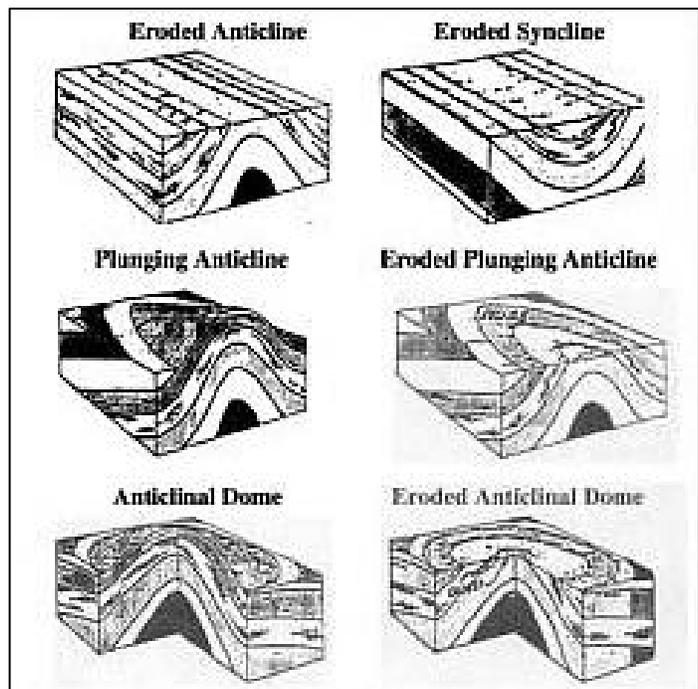


Figura 23. Principales tipos de pliegues erosionados
 (Gandallah, 2005)

⁷³ En los plegamientos hundidos (*plunging folds*) el eje de dirección no está nivelado. El patrón superficial que deja un plano de erosión en este tipo de plegamientos, es llamado nariz (*nose*) (Gandallah, 2005).

3.2.1.8 INCONFORMIDADES PALEOKÁRSTICAS

Varios estudios en Francia, Australia, Canadá, Estados Unidos de América, China y Rusia, han dado evidencia de afloramientos paleokársticos. En muchas secuencias de rocas carbonatadas es posible encontrar inconformidades constituidas por superficies de disolución o cavidades inertes, i.e. paleokarst (Ford, y otros, 2007).

3.2.1.9 FISICOQUÍMICA DE LA DISOLUCIÓN EN ROCAS KÁRSTICAS

El conjunto de procesos que desarrollan modelados kársticos, recibe el nombre de *karstificación*; es un intemperismo mezcla de acciones químicas (*disolución*⁷⁴, hidratación, sustitución iónica y óxido-reducción) y físicas (transferencia de masa y *difusión*⁷⁵) (Pedraza Gilsanz, 1996). En sales (yeso, halita o anhidrita), el proceso es una simple disolución en medio acuoso, que depende de la concentración (actividad) iónica en el agua y su variación con la temperatura. Las rocas carbonatadas son muy poco solubles en agua pura, por lo cual su karstificación tiene que ver más con reacciones químicas y fenómenos físicos complejos en las interfaces atmósfera-suelo-agua-roca (Pedraza Gilsanz, 1996). El dióxido de carbono es un gas que está presente en la atmósfera, en el suelo y disuelto en las aguas de lluvia y subterráneas, ríos, lagos y océanos. En su disolución por el agua se encuentra como H_2CO_3 , ácido carbónico⁷⁶, y constituye el propulsor de la disolución de los carbonatos y, por consiguiente, de la generación del karst (Dreybrodt, (2004) 2008).

El proceso de karstificación tiene lugar en cuatro fases (Pedraza Gilsanz, 1996) (**Figura 25**):

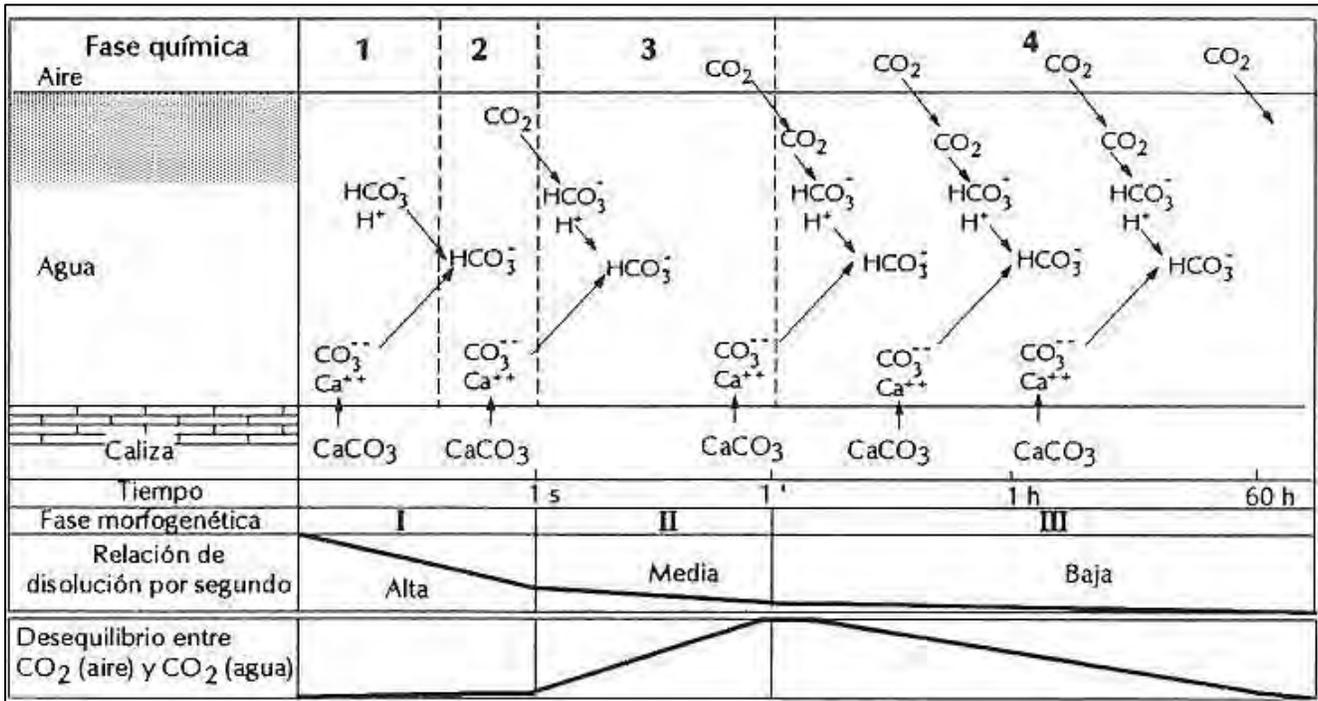


Figura 25. Esquema general de la karstificación en rocas calizas
 (Bögli, (1980) 1996)

Fases de karstificación según la interrelación de los tres sistemas implicados.

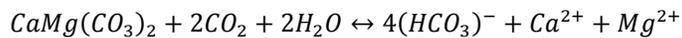
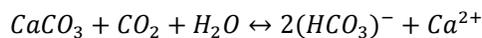
⁷⁴ Proceso en el que la roca o parte de la misma se combina con el agua para formar una solución o conjunto de solutos (Gutiérrez Elorza, 2008).

⁷⁵ Proceso físico irreversible, en el que partículas materiales se introducen en un medio que inicialmente estaba ausente, aumentando la entropía (equilibrio termodinámico) del sistema conjunto formado por las partículas difundidas o soluto y el medio donde se difunden o disolvente.

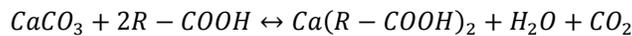
⁷⁶ Formación de ácido carbónico disociado: $CO_2 + H_2O \leftrightarrow CO_3H^- + H^+$

1. Disolución escasa en agua pura (bajos contenidos de anión bicarbonato), disociándose en anión carbonato y catión metálico⁷⁷. La tasa de disolución es alta pero muy limitada en el tiempo, generando formas superficiales con desarrollo rápido.
2. Formación de ácido carbónico disociado (anión bicarbonato + protón) en bajas proporciones, a partir de la oxidación del anión carbonato (pH<8.5). La tasa de disolución es alta-media, dando lugar a formas más incisivas, también superficiales.
3. Intervención del dióxido de carbono atmosférico o edáfico, que está físicamente disuelto en el agua. Una pequeña proporción será hidratada y químicamente disuelta dando ácido carbónico disociado, y retroalimentando el proceso al formarse más ácido carbónico a partir de aniones carbonato procedentes de la roca; la disponibilidad del mismo (fuerte y agresivo) hace que ésta fase, aun con tasas de disolución medias, sea la más importante en la karstificación superficial.
4. Fase con total interacción atmósfera-agua-roca. El desequilibrio entre el contenido en dióxido de carbono del aire y el agua, llega a suplirse disolviendo físicamente grandes cantidades de aquél (en función de su disponibilidad y la temperatura del agua). Así aparecen numerosas reacciones reversibles hasta llegar a un cierto equilibrio que puede ser alterado según: el flujo del agua, superficie de roca expuesta, variaciones del nivel freático, temperatura, etc. Las tasas de disolución disminuyen progresivamente, aunque la duración de esta etapa llega a generar karstificaciones importantes.

En el caso de calizas y dolomías, el conjunto de reacciones químicas son respectivamente:



Los compuestos orgánicos (ácidos húmicos) intervienen en la disolución de las calizas de manera similar. En estos casos la reacción es favorecida por aumentos en la temperatura:



Así, las reacciones fisicoquímicas en la disolución de rocas kársticas son tanto más efectivas cuanto mayor sea la *agresividad* y *movilidad* del agua. Agresividad que depende del grado de disociación iónica, directamente relacionado con su disponibilidad en CO_2 ; y movilidad, controlada por la red de circulación o flujo (Pedraza Gilsanz, 1996). La percolación de aguas agresivas, a través de discontinuidades (diaclasas, fracturas y planos de estratificación), impulsa el proceso de disolución subsuperficial. Conforme estos flujos hídricos se internan en el subsuelo, se alejan del ambiente atmosférico y edáfico que les proporciona CO_2 , a la vez que se cargan de carbonato, así pierden agresividad y aumenta la fase saturada con baja capacidad de disolución (Pedraza Gilsanz, 1996). La **Figura 26** señala la cantidad de carbonato disuelto en función del contenido en CO_2 . Las curvas representan la máxima cantidad de $CaCO_3$ que puede disolverse en dióxido de carbono, i.e. curvas de equilibrio

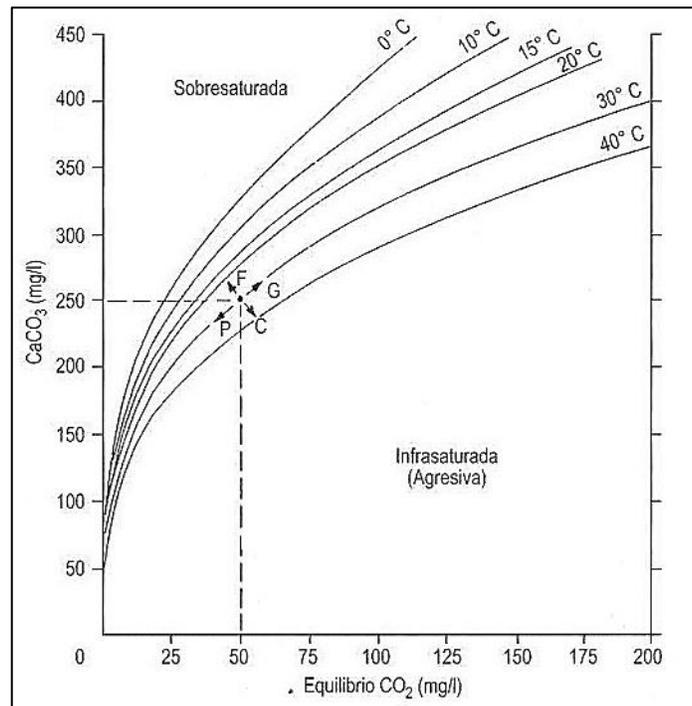


Figura 26. Cantidad de carbonato cálcico disuelto en función del contenido en dióxido de carbono (Trombe, (1952) 2008)

⁷⁷ $CaCO_3 + H^+ \leftrightarrow Ca^{2+} + HCO_3^-$

de saturación, que separan un campo de sobresaturación de otro de infrasaturación o de aguas agresivas. La disolución correspondiente al punto situado en la curva de saturación de 30°C puede enfriarse (hacia F) y disolverá más calcita; si se calienta (hacia C) precipitará algo de carbonato cálcico; si se pone en contacto con aire con menor cantidad de CO_2 (hacia P) perderá algo de CO_2 y precipitará carbonato cálcico y, finalmente, si la disolución encuentra aire con mayor proporción de CO_2 (hacia G) lo tomará y disolverá más calcita (Gutiérrez Elorza, 2008).

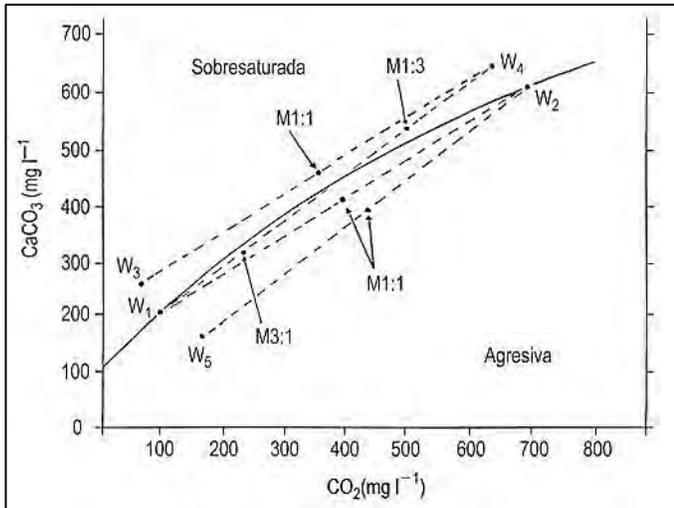


Figura 27. Corrosión por mezcla ilustrada con diversos ejemplos
 (Jennings, (1985) 2008)

Al proceso de saturación por pérdida de CO_2 , se oponen la *corrosión por enfriamiento*, dada por la disminución en la temperatura del agua saturada tras la percolación profunda (hacia F en la **Figura 26**); y la *disolución por mezcla*, en donde dos aguas saturadas generan al mezclarse una fase no saturada, transformándose así en aguas agresivas con capacidad de ampliar los conductos subterráneos (Bögli, (1980) 1996). En el lado convexo de la curva de saturación (**Figura 27**) se encuentra el campo de sobresaturación y en el cóncavo el infrasaturado de aguas agresivas. Cualquier mezcla de aguas saturadas W_1 y W_2 proporciona agua agresiva (M1:1 para una mezcla igual). La mezcla de aguas saturadas W_3 y W_4 permanece sobresaturada. La mezcla de W_2 saturada y W_5 agresiva es agresiva en cualquier proporción. M1:3 (una parte saturada de W_1 y 3 partes sobresaturadas de W_4) permanece sobresaturada, pero M3:1, la mezcla contraria, llega a ser agresiva (Gutiérrez Elorza, 2008). El carácter reversible de estas reacciones origina en la precipitación: evaporación de agua (principalmente en zonas tropicales), disminución del contenido en CO_2 (en zonas templadas por descompresión o acción biótica), y acción bacteriana (a nivel local, como modificadoras del pH) (Pedraza Gilsanz, 1996). En función del pH, la disolución es mayor en la calcita que en la dolomita, siendo mucho menor en la magnesita (Chou, y otros, (1989) 2008) (**Figura 28**).

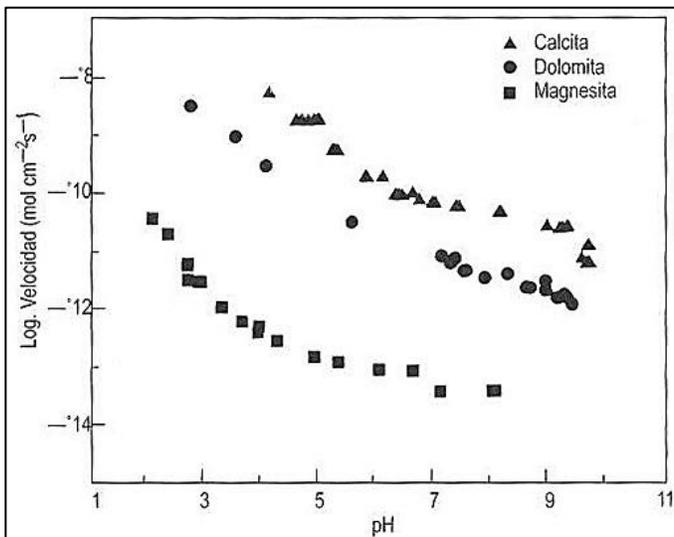


Figura 28. Velocidades de disolución, en función del PH, de la calcita, dolomita y magnesita
 (Chou, y otros, (1989) 2008)

Con el fin de entender las reacciones químicas en la superficie sólida de las calizas, se ha propuesto un modelo de "escalones, hendiduras y agujeros" (Morse, y otros, (2002) 2007) (**Figura 30**), el cual muestra la disolución de la calcita a escala molecular, o lo que podría nombrarse como el *origen del karst*. En la calcita los átomos y moléculas están ordenados en capas (**Figura 29**). Los átomos *aislados* que descansan en la capa superior, poseen una mayor disponibilidad de energía libre para su disociación, debido a que probablemente se encuentran unidos por un solo enlace químico. Siguiendo esta lógica, es probable que los átomos situados en *escalones* estén unidos por dos enlaces, en *hendiduras* por tres o cuatro, y en *agujeros* por 5 o más. Éstos son precisamente los sitios preferidos de disolución.

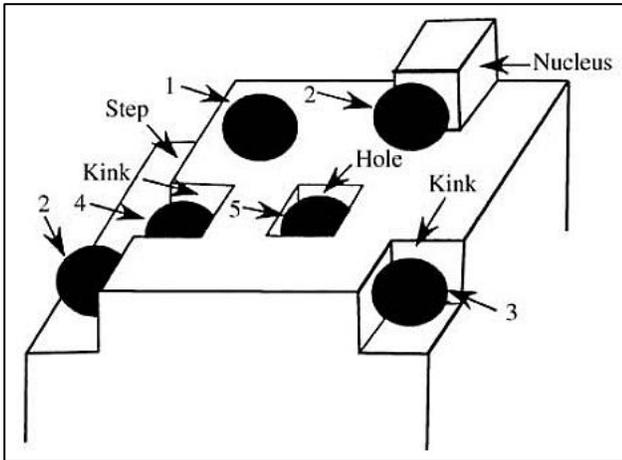


Figura 29. Modelo de disolución y acreción en superficies de calcita a escala molecular
 (Morse, y otros, (2002) 2007)

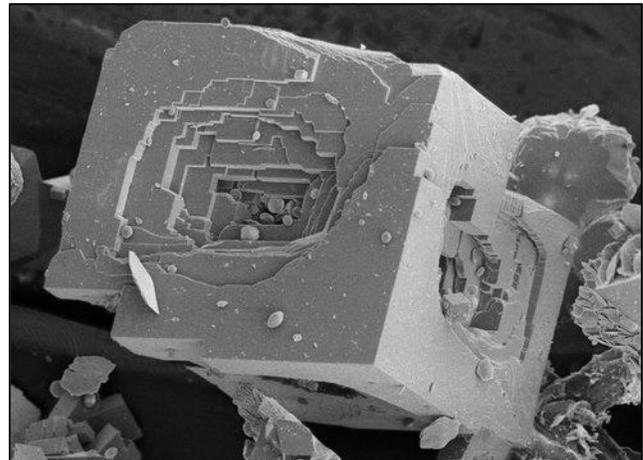
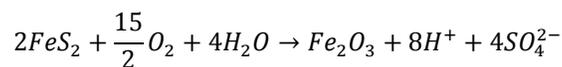


Figura 30. Cristal de calcita en disolución
 Reproducido de (Gunning, 2011)
 Microscopía electrónica de barrido (aprox. 6 μm lado)

Así, un ion H^+ que ha sido difundido a la superficie caliza se moverá a través de ésta hasta encontrar una molécula de CO_3^{2-} . El ion HCO_3^- creado se difundirá dejando un átomo Ca^{2+} libre y disociado a la vez. Varios estudios han demostrado que las mayores tasas de disolución tienen lugar en las superficies *escalonadas*, esto permite la destrucción subsecuente de capas más profundas. Las tasas de disolución en los agujeros pueden alcanzar 800 nanómetros⁷⁸ de profundidad en 30 minutos. Los núcleos *aislados* (**Figura 30**) poseen múltiples enlaces que los unen a la capa superior de la calcita, es por ello que estos sitios son más importantes en la precipitación de calcita que en su disolución (Ford, y otros, 2007).

Finalmente, es importante mencionar que existen otras reacciones químicas que son capaces de producir iones H^+ libres, los cuales pueden acidificar el ambiente y en su caso, incrementar la disolución de la calcita. Un ejemplo es el *sistema S-O-H*, que entre otros aspectos considera la oxidación de la *pirita* (FeS_2) y otros compuestos de hierro, muy comunes en las lutitas interestratales de macizos calizos (Ford, y otros, 2007). La oxidación de la pirita⁷⁹ está dada por la siguiente ecuación:



De esta manera, el sistema S-O-H contribuye ampliamente en la apertura inicial de conductos de disolución, tanto así que es considerado un factor de gran relevancia en los estudios kársticos (Ford, y otros, 2007).

3.2.1.10 DISTRIBUCIÓN Y TASA DE DENUDACIÓN KÁRSTICA

La *tasa de denudación disolutiva* es la relación establecida por el estado de saturación de la disolución y el tiempo empleado para alcanzar el equilibrio químico. La *denudación disolutiva* o erosión química, es comúnmente expresada en unidades de volumen/área ($m^3km^{-2}a^{-1}$), equivalencia dada por el espesor de roca removida por unidad de tiempo a través de una superficie horizontal⁸⁰. La *tasa de denudación kárstica* considera ambas, la *erosión química* y la *erosión mecánica*.

⁷⁸ $1nm = 1 \times 10^{-9}m$

⁷⁹ Esta reacción puede o no ser moderada por acción bacteriana (Ford, y otros, 2007).

⁸⁰ La denudación disolutiva debe calcularse con base en la disolución kárstica bruta, la cual suma la disolución autogénica y alogénica (en caso de que esta se presente) (véase **Figura 31**), y resta la depositación kárstica (espeleotemas y tufa), producto de la disolución en la red de karstificación (Ford, y otros, 2007).

En general, tanto el clima como la geología son importantes en el control de desarrollo kárstico (Bakalowicz, (1992) 2007). El clima por el aporte de agua y CO_2 , y la geología por emplazar condiciones aptas (geomorfología, litología, evolución regional y neotectónica) para aumentar la transmisión hídrica a través del karst y modificar el potencial de dióxido de carbono (P_{CO_2}) (e.g. cuando una capa de sedimentos densos limita el intercambio de aire en profundidad, aumentando el CO_2 disuelto en aguas subterráneas; o al revés, cuando un estrato poroso previamente karstificado, permite el intercambio de aire, reduciendo el CO_2 (Ford, y otros, 2007)). En ciertas condiciones los factores de desarrollo endokárstico tienen que ver, en mayor medida, con recursos *hipogénicos*⁸¹, como el sistema S-O-H (véase **3.2.1.9**).

Sin embargo, varios autores opinan que el factor climático es el principal control de desarrollo kárstico. Ford (2007) afirma que la precipitación, más que la temperatura, es el principal control, de manera que las mayores tasas de denudación disolutiva de las calizas, se localizan en los sitios más húmedos del planeta.

Otros autores deducen la existencia de una zonación kárstica variable en función de diferentes factores, como temperatura, precipitación, vegetación, etc. (Gutiérrez Elorza, 2008), hecho que ha sido evidenciado en un estudio de *disolución máxima potencial* (DMP)⁸² aplicado a 243 estaciones meteorológicas, representativas de los principales tipos climáticos (Gombert, (1995) 2008) (**Tabla 10**). En este tenor, (Salomón, (2005) 2008) afirma que el principal control de desarrollo kárstico es el clima, seguido de la litología y el grado de fracturación.

Tabla 10. Media de la disolución potencial máxima (DMP) por tipo climático

Reproducido de (Gombert, (1995) 2008)

| Tipo climático | DMP mm/ka | Superficie | Número de estaciones |
|-----------------|-----------|------------|----------------------|
| Desértico | 3.4 | 23 | 20 |
| Montaña | 50.9 | 5 | 12 |
| Polar | 42.5 | 15 | 12 |
| Frío | 29.4 | 19 | 35 |
| Templado frío | 36.6 | 6 | 38 |
| Templado cálido | 31.9 | 4 | 23 |
| Mediterráneo | 88 | 2 | 26 |
| Subtropical | 21 | 9 | 24 |
| Tropical | 92.7 | 8 | 25 |
| Ecuatorial | 88.2 | 9 | 28 |
| TOTAL/MEDIA | 40.6 | 100 | 243 |

Ahora bien, el origen del agua y la composición del macizo rocoso implicado en la karstificación, marcan la diferencia entre los tres principales *sistemas de denudación kárstica*: *autogénico* (autóctono), *alogénico* (alóctono) y *mixto*. Un sistema autogénico está compuesto completamente por rocas kársticas, cuyo aporte hídrico deriva solamente del agua precipitada sobre él (**Figura 31a**). En contraste, el agua implicada en un sistema alogénico, proviene de la escorrentía de áreas de captación no kársticas (**Figura 31b**). Sin embargo, en la práctica es más común encontrar sistemas mixtos de denudación kárstica, es decir, aquellos con componentes autogénicos y alogénicos (**Figura 31c**) (Ford, y otros, 2007). Estudios en Nueva Zelanda, Inglaterra (Pitty, (1968a) 2007) y Francia (Bakalowicz, (1992) 2007), han demostrado que los sistemas alogénicos presentan mayor erosión kárstica que los sistemas autogénicos (considerando que los primeros presentan escorrentías de entrada en posición superior al macizo kárstico) (Ford, y otros, 2007) (**Figura 32**). Esto se debe a que el aporte hídrico en los primeros es puntual, hecho que aumenta el volumen de agua infiltrada por unidad de área, y en consecuencia amplía la red de disolución. En estos casos, la denudación disolutiva se incrementa, cuando las rocas no kársticas se encuentran en las cabeceras de captación (Ford, y otros, 2007) (**Figura 32**).

⁸¹ Dicho de un terreno o de una roca: formado en el interior de la Tierra (Real Academia Española, 2011).

⁸² La DMP es expresada en mm/ka y tiene en cuenta esencialmente la pluviometría y la temperatura media anual y también la producción de CO_2 (agresividad del agua) (Gutiérrez Elorza, 2008).

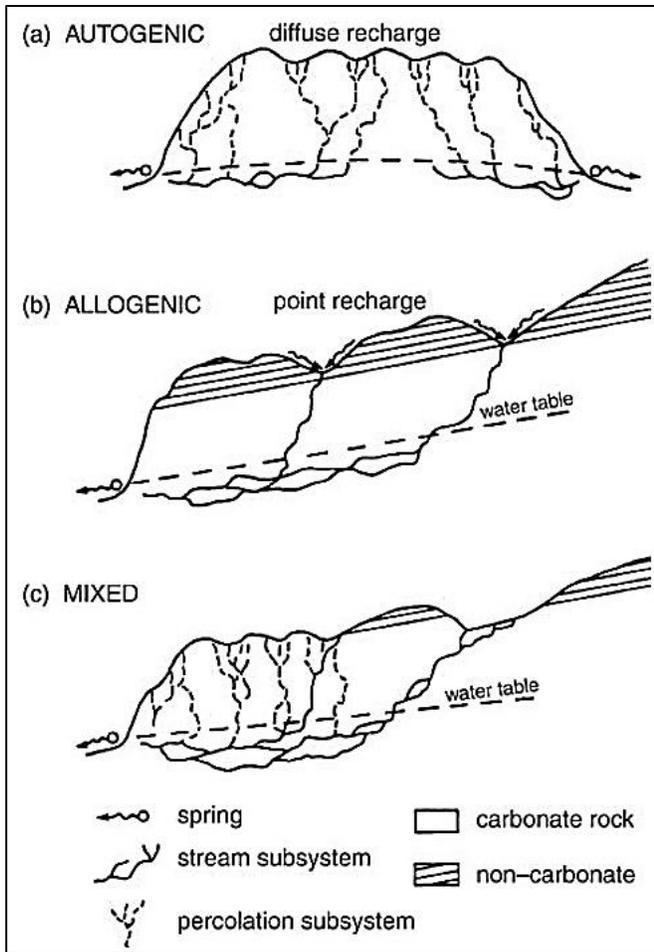


Figura 31. Principales sistemas de denudación kárstica
 (Ford, y otros, (1989) 2007)

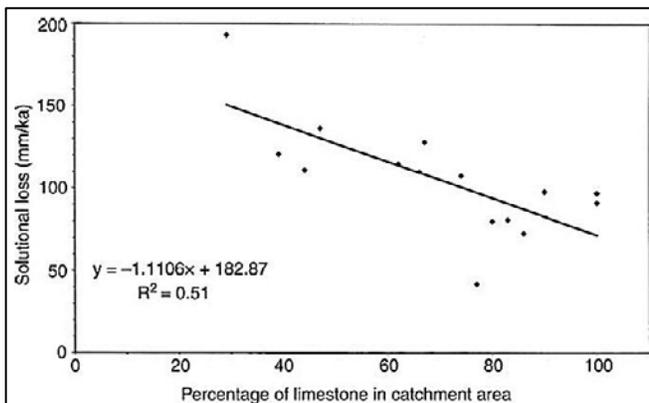


Figura 32. Relación entre tasas de denudación disolutiva y porcentaje de caliza expuesta en el área de captación
 (Ford, y otros, 2007) Con datos de (Pitty, (1968a) 2007) y (Bakalowicz, (1992) 2007)

Bajo condiciones de un sistema *autogénicoabierto*⁸³ de denudación kárstica, en condiciones climáticas presentes y para un cierto aporte de agua (en estado líquido), la denudación disolutiva se incrementa conforme aumenta la latitud (Ford, y otros, 2007). De manera similar, con el incremento en altitud el P_{CO_2} disminuye ligeramente en la atmósfera (por lo menos hasta los 4000 msnm) (Zhang, (1997) 2007). En contraste con estos dos aspectos se encuentra el papel que ejerce la cubierta vegetal y organismos asociados (bacterias, hongos, algas, líquenes y animales), los cuales están íntimamente relacionados con la cantidad de CO_2 edáfico (**Figura 33**) y ésta a su vez con la concentración de calcio en aguas subterráneas. De manera que en condiciones de escorrentía, la denudación disolutiva en superficies con cubierta vegetal, tiende a ser mayor que en aquellas áreas desprovistas de ésta (Ford, y otros, 2007). Las características producidas, por la acción de la flora y fauna, en las rocas kársticas, se denomina *biokarst* (Viles, (1984) 2007).

A manera de síntesis, (Ford, y otros, 2007) engloban la relación existente entre los diferentes procesos planteados, las rocas kársticas y las morfologías resultantes en 4 puntos:

1. Los procesos hidrológicos determinan la localización general de la erosión en las rocas kársticas, y por tanto, son usualmente el principal control del desarrollo de las morfologías kársticas. En particular, la naturaleza de la recarga hidrológica, sea autogénica, alogénica o mixta, tiene una significancia morfológica considerable debido a su influencia en la distribución horizontal y vertical de la corrosión y *corrosión*⁸⁴.
2. La litología y estructura geológica pueden ser tan importantes como para dominar el desarrollo de las morfologías kársticas, sin embargo, la geología en general tiene influencia sobre el desarrollo kárstico a través del control de: (i) el aprovisionamiento de vías de disolución, (ii) la resistencia de la roca y (iii) la susceptibilidad de ésta a la corrosión y *corrosión*.

⁸³ Aquel con corrientes hídricas de entrada y salida.

⁸⁴ Proceso de pulimiento, limadura y laminación de las rocas por el choque y roce de partículas desplazadas por agua, viento, hielo, etc. (Lugo Hubp, 1989).

3. La variabilidad en cantidad, de la escorrentía en las diferentes regiones húmedas, influye en la erosión kárstica anual y por tanto, en la tasa de evolución del paisaje, pero no necesariamente en el estilo morfológico de la topografía kárstica desarrollada.

4. La variación térmica es significativa en el desarrollo morfológico, principalmente a través de su influencia en: (i) el balance hídrico, (ii) la tasa de ocurrencia de las reacciones químicas y por tanto de la distribución vertical de la disolución, y (iii) los procesos bioquímicos que llevan a la acidificación del agua de infiltración. Las morfologías deposicionales son también influidas por la temperatura a través de la evaporación y procesos biológicos.



Figura 33. Ciclo del carbono
 (Martínez Martínez, 2004)

3.2.1.11 TAXONOMÍA GENERAL DEL KARST

Una primera aproximación a la taxonomía del karst está relacionada precisamente con la zonación climática. Tal como afirma (Ford, y otros, 2007), las morfologías kársticas resultan de la acción sincrónica del sistema geoquímico e hidrológico, y aunque estos procesos pueden operar en un amplio rango de ambientes, existen dos condiciones que limitan su desarrollo, la aridez y el frío extremo. Por tanto, el karst con desarrollo "normal" es característico de las regiones húmedas, en donde el agua se presenta normalmente en fase líquida (Ford, y otros, 2007).

Con base en este criterio de clasificación (Gutiérrez Elorza, 2008) distingue cuatro tipos de karst: karst de las regiones frías, karst de las regiones templadas (*holokarst*⁸⁵ y *fluviokarst*), karst de las regiones áridas, y karst de las regiones tropicales. En donde el *karst tropical* ha sido definido como: llanuras de corrosión con colinas aisladas (Ford, y otros, (1989) 2007), abundante actividad biológica en el subsuelo, lo que provoca alta acidificación subcutánea; también gran provisión de agua en superficie, originando disoluciones diferenciales (torres y pináculos) (Pedraza Gilsanz, 1996), o también, aquellos sitios con abarrancamiento intenso de laderas debido a las fuertes precipitaciones, que dan origen a depresiones cerradas irregulares; con elevada evaporación, lo que da lugar a la precipitación de carbonato cálcico de gran dureza sobre las laderas escarpadas, que a menudo se considera como la causa principal de la gran inclinación de las mismas (Sweeting, (1972) 2008).

El karst tropical se desarrolla bajo dos condiciones: temperatura media superior a 17-18°C y precipitaciones anuales promedio por encima de 1000 mm (Salomón, (2005) 2008), y se encuentra fundamentalmente en zonas intertropicales con afloramientos calizos existentes en las cadenas montañosas: Grandes Antillas, algunas de las regiones que orlan el Mar Caribe, Sureste de Asia, Indonesia, Nueva Guinea y varias áreas continentales africanas (Gutiérrez Elorza, 2008) y americanas (incluyendo México) (véase 2.2).

⁸⁵ Es el macizo carbonatado en el que toda el agua de precipitación se infiltra y carece de cursos fluviales superficiales (Cvijic, (1924b) 2008).

3.2.2 GEOMORFOLOGÍA REGIONAL DEL KARST EN EL PARQUE ESTATAL DE LA SIERRA DE TABASCO

3.2.2.1 ESTUDIOS PRECEDENTES

Los estudios geomorfológicos precedentes acerca del karst en México son relativamente escasos, sin embargo, la taxonomía general del karst se encuentra bien documentada (Lugo Hubp, y otros, 1992) (**Figura 1**).

Al respecto, Ramón Espinosa (1990), en su propuesta de clasificación de karst de la República Mexicana, determina el relieve de la región de Teapa como karst de tipo tropical. Con respecto a lo planteado en el apartado **2.2**, (Lugo Hubp, y otros, 1992) determinaron el relieve kárstico del Parque Estatal de la Sierra de Tabasco como karst tropical (**Figura 1**), al igual que (Gerstenhauer, 1960) y (McDonald, 2007). Por su parte, dentro del decreto estatal de esta ANP, y del Programa de Ordenamiento Ecológico del Estado de Tabasco se hace mención implícita de esta determinación (véase **2.4** y **2.5.1.2**).

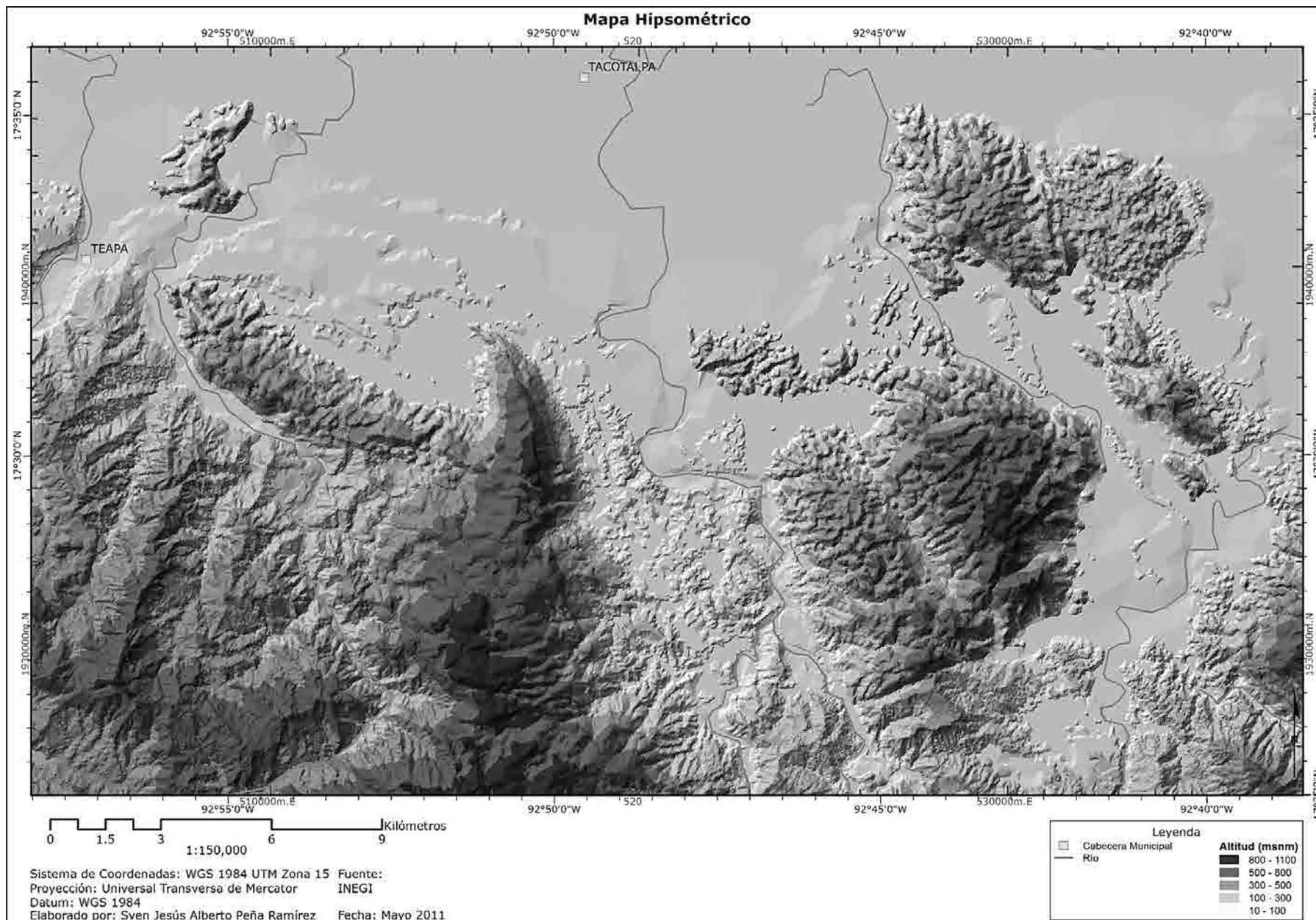
3.2.2.2 GEOMORFOLOGÍA REGIONAL DEL KARST EN EL PARQUE ESTATAL DE LA SIERRA DE TABASCO

Litológicamente el Parque Estatal de la Sierra de Tabasco comprende en su mayoría rocas calizas y lutitas calcáreas del Cretácico Superior, depositadas en un ambiente marino de plataforma, fosilíferas y con estratificación que varía de mediana a gruesa (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006) (**Mapa 2**).

La evolución tectónica del área dio como resultado la formación de geoformas representadas por cabalgaduras, anticlinales y sinclinales con una orientación preferencial noroeste-sureste, las cuales fueron posteriormente deformadas en domos con distribución irregular, y finalmente falladas por desplazamientos laterales izquierdos asociados al sistema Polochic-Motagua de edad Mioceno-Plioceno (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006). Esta dinámica geológica ocasionó una fracturación intensa en la roca formando numerosas vías de disolución. Así, el plegamiento, deformación, levantamiento isostático y fracturamiento de la plataforma calcárea generó un gran potencial erosivo, evolucionando en sierras complejas y escarpadas con alto desarrollo kárstico, y con altitudes que van de los 100 a los 900 msnm (**Mapa 3**) (**Mapa 9**).

Tal como se ha planteado anteriormente, el proceso de karstificación se encuentra íntimamente relacionado con el contexto hidrológico, climático y biológico. Al respecto, el Parque Estatal de la Sierra de Tabasco se ubica dentro de la zona intertropical, lo que aunado a su posición geográfica, en relación con la distribución de tierras y mares, le confiere un clima cálido húmedo con lluvias todo el año (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006) (**Mapa 5**). En el área de estudio, este clima desarrolla una precipitación media anual que va de los 3000 a los 4500 mm y una temperatura media anual de 25.6°C, magnitudes muy superiores a las requeridas para el desarrollo del karst tropical (véase **3.2.1.11**). Esta pluviosidad y temperatura casi constante participa activamente en la tasa de evolución del paisaje, el balance hídrico y la tasa de ocurrencia de las reacciones químicas y bioquímicas asociadas a la disolución kárstica, lo que mantiene un estado de desarrollo constante del paisaje, o en otras palabras, un karst activo.

Dicha condición hidroclimática sumada a las características geológicas del área, establece en términos generales un sistema de denudación kárstica de tipo autogénico, i.e. una recarga hidrológica autogénica, la cual ha desarrollado escorrentías de entrada en posición superior en los macizos kársticos y un alto grado de disolución vertical, drenaje que va de dendrítico a desordenado (**Mapa 4**) con depresiones cerradas irregulares, grutas y colinas residuales con geometría cónica, de cúpula, mogote y torre, típicas del karst tropical.



Mapa 9. Mapa Hipsométrico

Aunado a lo anterior, la cubierta vegetal presente en el PEST, consistente de selva alta perennifolia y mediana subperennifolia (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006) (**Mapa 7**), con estratificación vertical bien desarrollada, y su fauna asociada, aumentan la concentración de CO_2 edáfico (**Mapa 6**), lo que a su vez incrementa la acidificación del agua de infiltración y con ello la disolución kárstica.

Así, tal como se ha corroborado en la caracterización geográfica del área de estudio, las condiciones generales del karst en el Parque Estatal de la Sierra de Tabasco cumplen los requisitos necesarios para su determinación como karst tropical.

3.3 GEOMORFOLOGÍA DEL KARST EN EL PARQUE ESTATAL DE LA SIERRA DE TABASCO

3.3.1 GEOMORFOLOGÍA Y TAXONOMÍA DEL KARST TROPICAL

De acuerdo con las características particulares de la presente investigación, en esta sección se expondrán únicamente los elementos necesarios para la caracterización geomorfológica y paisajística de mediana y gran escala del exokarst tropical del Parque Estatal de la Sierra de Tabasco.

Así, además de lo mencionado en la sección **3.2.1**, la comprensión de la geomorfología exokárstica tropical demanda el estudio y análisis integral de unidades geomorfológicas como el karren, dolinas, valles, gargantas, fuentes kársticos, poljes, planicies de corrosión kárstica y colinas kársticas residuales; procesos geomorfológicos asociados a estas; cambios en el nivel base; secuencias y modelos evolutivos del paisaje; y taxonomía kárstica tropical, principalmente (Ford, y otros, 2007) (Pedraza Gilsanz, 1996).

3.3.1.1 KARREN

El término *karren*, que es lo mismo que *lapiaz*, se refiere al conjunto de formas kársticas superficiales y subsuperficiales, consistentes en una agrupación de hondonadas, ranuras y canales de disolución, generalmente de pequeña escala (Ford, y otros, 2007). Estos micromodelados de gran variedad morfológica se desarrollan sobre rocas carbonatadas, sulfatadas y en todos los afloramientos salinos; suelen aparecer agrupados, formando *campos de lapiaz* (**Figura 34**); alcanzan un mayor desarrollo en bloques homogéneos de caliza o mármol de grano fino y estratificación masiva (Ford, y otros, 2007), y en las zonas tropicales en donde las lluvias son más abundantes e intensas (Gutiérrez Elorza, 2008).



Figura 34. Campo de lapiaz en Lomas Alegres 3ª Sección, Municipio de Tacotalpa, Tabasco
Fotografía de campo

En la nomenclatura propuesta por Ford y Williams (2007), basada en criterios morfológicos y factores genéticos, se identifican más de 10 tipos de karren (Ford, y otros, 2007). Estos pueden ser formas con planta circular, formas lineares controladas hidrodinámicamente o por fracturas, y formas poligenéticas. Entre las penúltimas se encuentran las *fisuras* o *kluftkarren*, hendiduras de disolución controladas por diaclasas maestras y fallas, normalmente de 1 a 10 m de longitud, con una tendencia a intersectar en ángulos de 60°, 90° y 120°, con *clints* o salientes de roca en bloque (*flachkarren*) distribuidas entre las primeras (**Figura 35**), las cuales pueden evolucionar en *bogaz* (fisuras grandes o corredores de disolución) (**Figura 36**), corredores y calles de mayor escala (Ford, y otros, 2007). La longitud de estas fisuras es inversamente proporcional a la densidad de las diaclasas maestras, y son especialmente mayores, en aquellas áreas en donde las diaclasas tienden a expandirse, a causa de la liberación de esfuerzos distensivos. Las paredes en el *kluftkarren* pueden ser paralelas o cónicas al incrementarse la profundidad.



Figura 35. Kluftkarren mostrando clints desnudos y fisuras rellenas de pasto, Gran Bretaña
 Reproducido de (Webb, y otros, 1998)

A su vez se identifican 6 tipos de *paisajes kársticos de karren* (**Tabla 11**).



Figura 36. Bogaz en calizas cretácicas de los Cañones. Piedra de San Martín. Pirineo de Navarra, España
 Reproducido de (Gutiérrez Elorza, 2008)

Tabla 11. Paisajes kársticos de karren
 Reproducido de (Ford, y otros, 2007)

| | |
|--|--|
| <i>Karrenfeld</i> | Tramos de karren expuesto. |
| <i>Pavimento calizo</i> | Es un tipo de karrenfeld dominado por clints regulares (flachkarren) y fisuras (kluftkarren). |
| <i>Karst de pináculos</i> | Topografía de pináculos desarrollada en rocas kársticas, a veces expuesta por la erosión del suelo. También conocido como bosque de piedras, con pináculos de hasta 45 m de altura y 20 m de ancho en la base. |
| <i>Karst ruiniforme</i> | Paisaje kárstico de fisuras anchas y clints degradados, expuestos por la erosión del suelo. Fase transicional a <i>tors</i> ⁸⁶ . |
| <i>Karst de corredores, karst laberíntico o tierra de fisuras gigantes</i> | Terrenos con fisuras y clints de mayor escala. Fisuras con un ancho de varios metros o más y más de 1 Km de largo. |
| <i>Karren costero</i> | Topografía disolutiva costera o lacustre desarrollada en roca caliza o dolomía, en ocasiones modelada por el pastoreo de animales marinos. Incluye muescas intermareales y submareales, y un denso desarrollo de pozos y micropozos. |

En específico, el *karst ruiniforme* (Perna, y otros, (1978) 2007) describe terrenos en donde el suelo ha sido eliminado por el desarrollo de fisuras excepcionalmente anchas y profundas, y en donde los clints no han evolucionado en pináculos (Ford, y otros, 2007). Este tipo de karst se asemeja a los bloques de un paisaje urbano en ruinas (**Figura 37**), y es común en pendientes suaves que han sufrido alta deforestación y erosión edáfica. Es en dolomías masivas y *crystalinas*⁸⁷ en donde tiene un mejor desarrollo (Ford, y otros, 2007).



Figura 37. Karst ruiniforme en Torcal de Antequera, España
 Reproducido de (que_de_risa, 2007)

⁸⁶ Masas de roca expuestas por la ruptura o fracturamiento de bloques (Encyclopedia Britannica, 2011).

⁸⁷ Textura de deposición no reconocible (**Figura 13**).

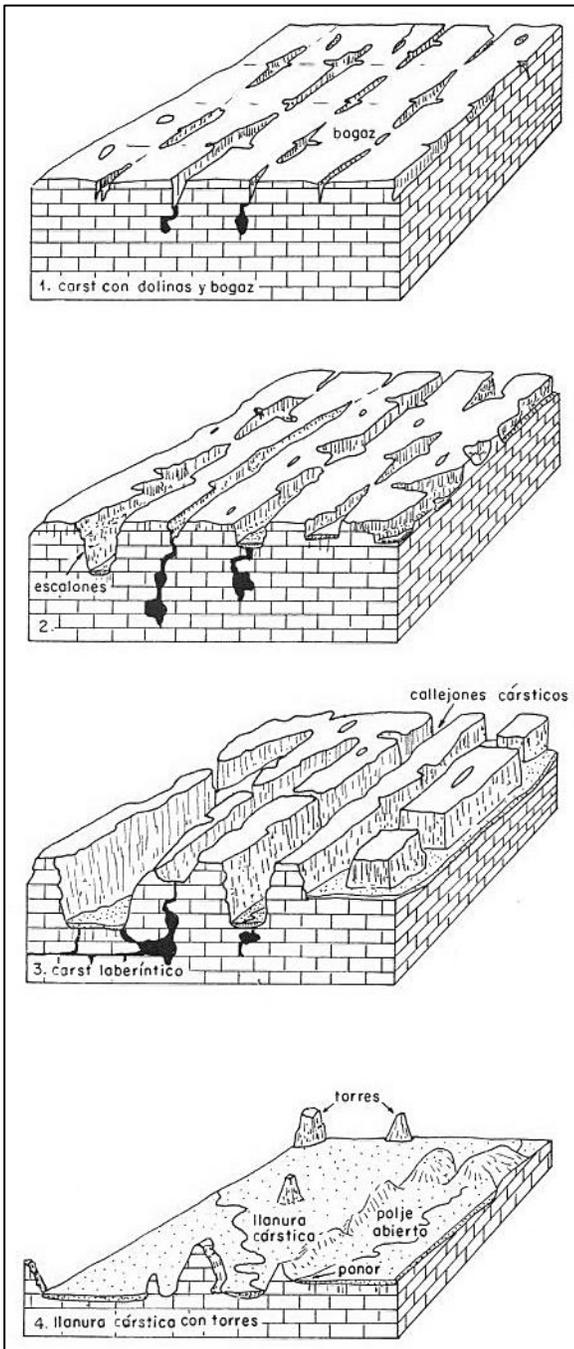


Figura 38. Evolución idealizada de un paisaje kárstico en el que predomina la erosión lineal (Pedraza Gilsanz, 1996)

1. Ampliación de las discontinuidades (kluftkarren) generando corredores de disolución (bogaz) y dolinas parcialmente conectadas con los conductos endokársticos.
2. Prosigue la ampliación y los corredores o pasillos forman callejones, valles muertos, y similares.
3. Se acentúa la profundización vertical y la conexión endo y exokárstica, desarrollando paisajes de karst ruiforme y karst laberíntico.
4. Etapa final con la aparición de relieves residuales (torres), llanuras kársticas y poljes. Fase de karst residual.

El *karst de corredores*, *karst laberíntico* o *tierra de fisuras gigantes* es un paisaje kárstico dominado por la intersección de corredores y cañones de disolución (White, 1988), definido también como topografías de corredores alineados o en intersección (Ford, y otros, 1989). Por su parte, Haryono y Day (2004) afirman que el desarrollo del karst laberíntico es distintivamente lineal, incorporando valles meándricos más que depresiones cerradas, y está controlado, predominantemente, por fallas y diaclasas maestras.

En este tipo de karst los valles cuadrados y las depresiones cerradas amplias, formadas por el retroceso de paredes en las fisuras, se denominan *valles encajonados* y *platea*, respectivamente (Ford, y otros, 2007). Al igual que en el kluftkarren, las paredes de los valles en el karst laberíntico pueden ser paralelas o cónicas, de pendientes escarpadas o moderadas (Haryono, y otros, 2004). Los requerimientos principales para el establecimiento de estos paisajes kársticos parecen ser la presencia de grandes conjuntos de diaclasas maestras (a menudo, fallas pequeñas con desplazamiento lateral), estratificación masiva, condiciones climáticas o topográficas que permitan un nivel freático profundo, y una disolución sostenida de larga duración (Ford, y otros, 2007). En la **Figura 38** se ilustra la evolución idealizada de un paisaje kárstico en el que predomina la erosión lineal, incluyendo las fases de kluftkarren, karst ruiforme, karst laberíntico y *karst residual*.

El karst laberíntico ha sido reportado en ambientes tropicales, templados, desérticos y semidesérticos. Por ejemplo, en ambientes templados en la región de Nahanni, Canadá, en donde las calles de disolución alcanzan hasta 1 Km de largo y 50 m de profundidad (Ford, y otros, 2007) (**Figura 39**); y en ambientes tropicales húmedos en la región de Maros al suroeste de Célebes (Sulawesi), Indonesia, con calles kársticas de 6-400 m de ancho, 50-200 m de profundidad, y más de 8 Km de largo (Sunartadirdja, y otros, (1960) 1978) (**Figura 40**); en la porción sur del Kegelkarst de Gunung Kidul, Java, Indonesia, con corredores de más de 4.5 Km de largo y 50-250 m de ancho (Haryono, y otros, 2004) (**Figura 20** y **Figura 41**); y en otros regiones tropicales y subtropicales localizadas en Sarawak, Indonesia; Montañas Estrella y Lago Ajamaru, Nueva Guinea; Sierra Maestra, Cuba; Arnhem Land y Cuenca Fitzroy, Australia; Tanga, Tanzania; Yunnan, China; y Bom Jesús da Lapa, Brasil (Brook, y otros, 1978).



Figura 39. Karst laberíntico en la región de Nahanni, Canadá, e Imagen de Satélite
Reproducido de (Sanborn, 2006) y (Google Inc., 2011)



Figura 40. Karst laberíntico en la región de Maros al suroeste de Célebes (Sulawesi), Indonesia
Reproducido de (Baskoro, 2009) y (Google Inc., 2011)



Figura 41. Karst laberíntico de Gunung Kidul, Java, Indonesia
Reproducido de (Haryono, y otros, 2004)

3.3.1.2 DOLINAS

El término *dolina* o *sinkhole* se refiere a cualquier depresión cerrada de origen kárstico de forma circular o elipsoidal en planta, de metros a un kilómetro de diámetro, su profundidad puede ser de pocos metros a más de un centenar de metros (Gutiérrez Elorza, 2008), y con pendientes de suaves a verticales (Ford, y otros, 2007). Las dolinas casi siempre están presentes en áreas con desarrollo kárstico, por tanto estas geoformas son consideradas elementos índice del karst. Pueden originarse por varios procesos incluyendo la disolución, colapso y hundimiento, dando lugar a una gran variedad de formas semejante a platos hondos, embudos y pozos cilíndricos (Ford, y otros, 2007).

Cvijic (1893) clasifica las dolinas en función de su morfología: *dolinas en cubeta* o plato o artesa, con el diámetro mucho mayor que la profundidad y bordes suavizados o escarpados (**Figura 42**); *dolinas en embudo* con el diámetro dos o tres veces la profundidad y fondo cubierto de detritos; y *dolinas en pozo*, en las que el diámetro es menor que la profundidad, de paredes subverticales, cuyo fondo puede dar paso a una galería subterránea (Gutiérrez Elorza, 2008). La unión de dos o más dolinas da origen a las *uvalas* (o *glades*), de fondos aplanados o irregulares, con pequeñas cuencas. Por su parte, Lehmann (1936) reconoce una diferencia morfológica entre las *dolinas de las zonas templadas* y los *cockpits*, dolinas de forma estrellada, características del karst tropical cónico, cuya denominación deriva de la región Cockpit de Jamaica (Gutiérrez Elorza, 2008) (**Figura 43**).

Los procesos que dan origen a las dolinas son la disolución, *flexión* (*sagging*), *sufosión*⁸⁸ y *colapso* (Gutiérrez Elorza, 2008). Entendiendo que el *colapso* implica fracturamiento y ruptura de

⁸⁸ Término que significa, esencialmente, excavar por debajo y, accesoriamente, perforar de abajo a arriba (Suvires, 2004).

la roca y el suelo; y que la *subsistencia* es un proceso mas gradual en el que se ve envuelta la flexión y el asentamiento de la superficie, sin ningún rompimiento evidente del suelo. Al respecto Waltham, A.C. y Fookes, P.G. (2003) proponen una clasificación genética en la que identifican seis tipos principales de dolinas (**Figura 44**).



Figura 42. Dolina en forma de plato sobre las calizas de Lias, Sierra de Javalambre, España
Reproducido de (Gutiérrez Elorza, 2008)

El agua al penetrar por las diaclasas y fracturas produce la disolución de las calizas y los solutos. A partir de ello, resulta un ensanchamiento de los planos de fracturación y una pérdida de volumen, que trae consigo un asentamiento y descenso de la superficie, representado por la dolina de disolución, permaneciendo en su interior la arcilla de descalcificación y el material transportado a la depresión cerrada. Cuando se tiene una orientación preferente de fracturación las dolinas se alinean bajo ese rumbo prevalente (Gutiérrez Elorza, 2008).

El buen desarrollo de las dolinas de disolución requiere precipitaciones importantes, superficies aplanadas, donde la jerarquización fluvial es difícil y, por consiguiente, la mayor parte del agua se incorpora al interior del macizo kárstico, y además, las calizas muy diaclasadas favorecen la infiltración (Sweeting, (1972) 2008).

La presencia de vegetación en el interior de las dolinas facilita su crecimiento, debido al intemperismo mecánico del sistema radicular y al incremento de CO_2 biogénico. Así mismo, las dolinas pueden acumular en su interior *terra rosa*, resultante de la descalcificación de calizas impuras con potencias que no suelen superar los 4 m. También por escorrentía superficial, sobre todo en las dolinas grandes, se sedimenta material aluvial (Gutiérrez Elorza, 2008).

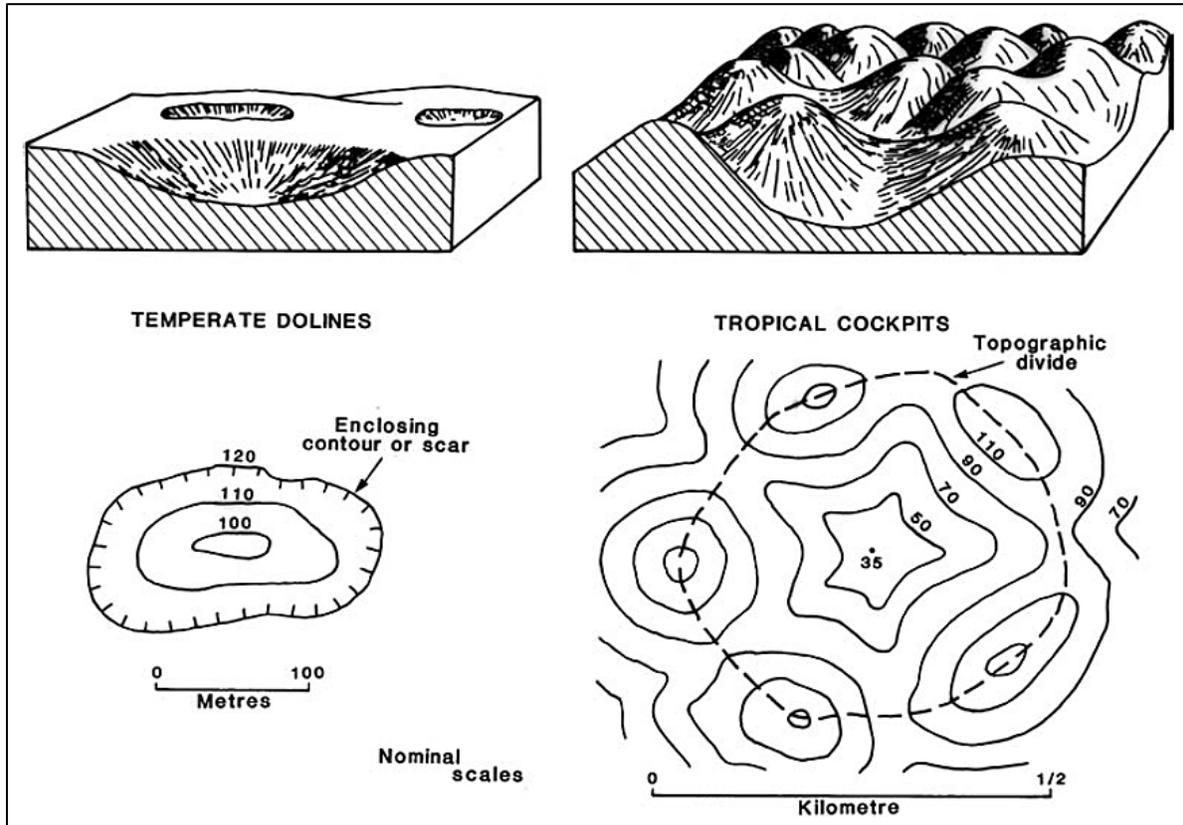


Figura 43. Diferencia morfológica entre las dolinas de las zonas templadas y los cockpits (Williams, (1969) 2007)

Izquierda. Delimitación de una dolina en una llanura (dolina convencional de las zonas templadas).

Derecha. Delimitación de una dolina en un terreno montañoso (cockpit convencional de las zonas tropicales húmedas).

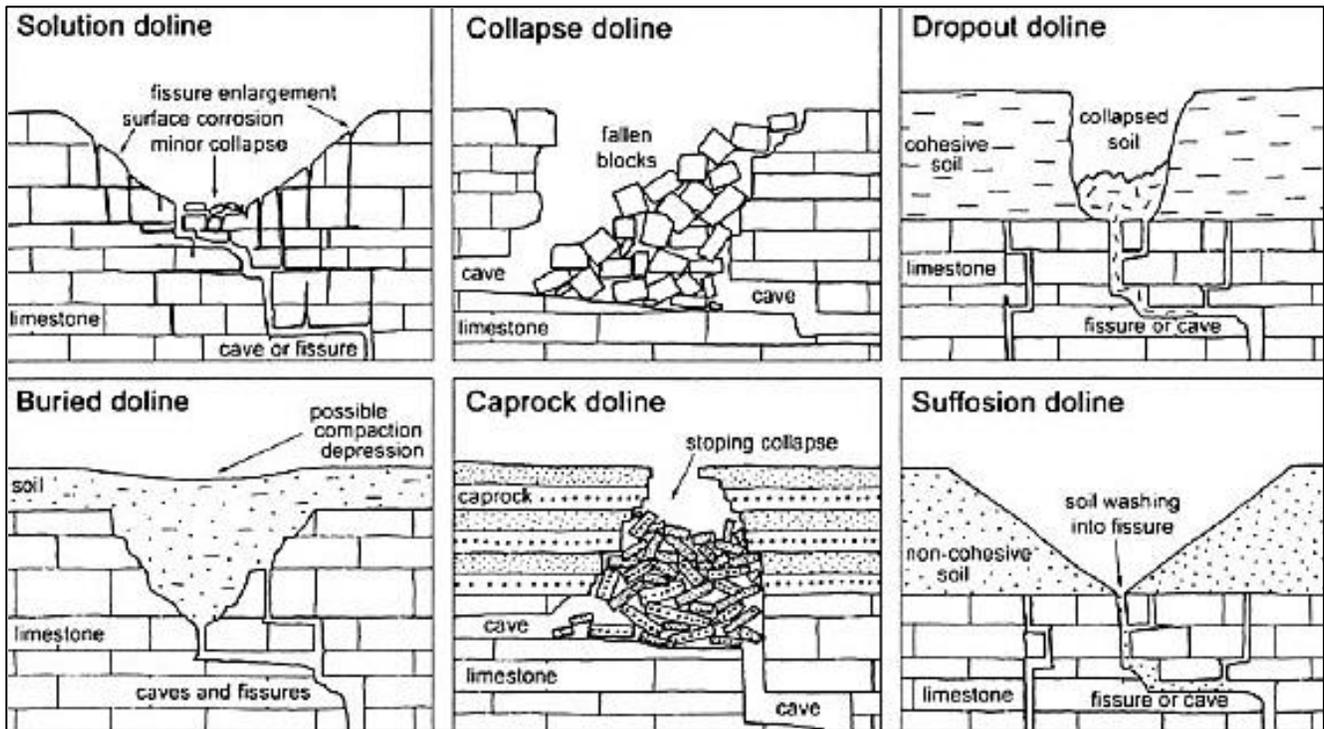


Figura 44. Seis tipos principales de dolinas: disolución, colapso, abandonada, enterrada, de roca estratificada y sufosión

(Waltham, y otros, (2003) 2007)

El desarrollo de las dolinas de colapso se favorece por tres factores principales: 1) elevada densidad de diaclasado, de tal forma que la roca no tenga en los techos de las cavidades la suficiente resistencia mecánica; 2) ausencia de huecos con una anchura lo suficientemente grande para iniciar la flexión; 3) condiciones *vadosas*⁸⁹ en las que el techo de las cavidades tiene un mayor peso efectivo (Gutiérrez Elorza, 2008).

Los *tiankeng* son grandes dolinas de colapso dispuestas sobre las cabeceras y sumideros afluentes de caudalosos ríos subterráneos, con descargas de varios metros cúbicos por segundo. Estas dolinas están comúnmente asociadas al *karst poligonal* (Ford, y otros, 2007). Un ejemplo de este tipo de dolinas es el *tiankeng* de Dashiwei en el karst de Leye, Guangxi, China (**Figura 45**). Esta estructura alcanza una profundidad de 613 m y 600 m de longitud de este a oeste, y en su base está cubierta por una rampa de escombros de colapso de más de 100 m de altura (Zhu, y otros, 2006) (**Figura 46**).



Figura 45. Vista aérea oblicua del tiankeng de Dashiwei en el karst de Leye, Guangxi, China
 Reproducido de (Zhu, y otros, 2006)

Debido a que la mayoría de las dolinas participan de la actuación de varios procesos para su generación; son, por consiguiente, poligenéticas (Ford, y otros, 1989). Así, aunque la disolución es el proceso detonador y dominante en la formación de las dolinas, otros procesos como el colapso también pueden contribuir en su desarrollo (Ford, y otros, 2007). A su vez, Drake & Ford (1972) y Kemmerly (1982) reconocen que generaciones diferentes de dolinas pueden desarrollarse a partir de la fragmentación de los estratos rocosos, o de la socavación secundaria dentro de una dolina antigua.

⁸⁹ La zona vadosa o de aireación es aquella en la cual los conductos generalmente están rellenos de aire, salvo en momentos con alimentación directa a partir de lluvias o similar (Pedraza Gilsanz, 1996).

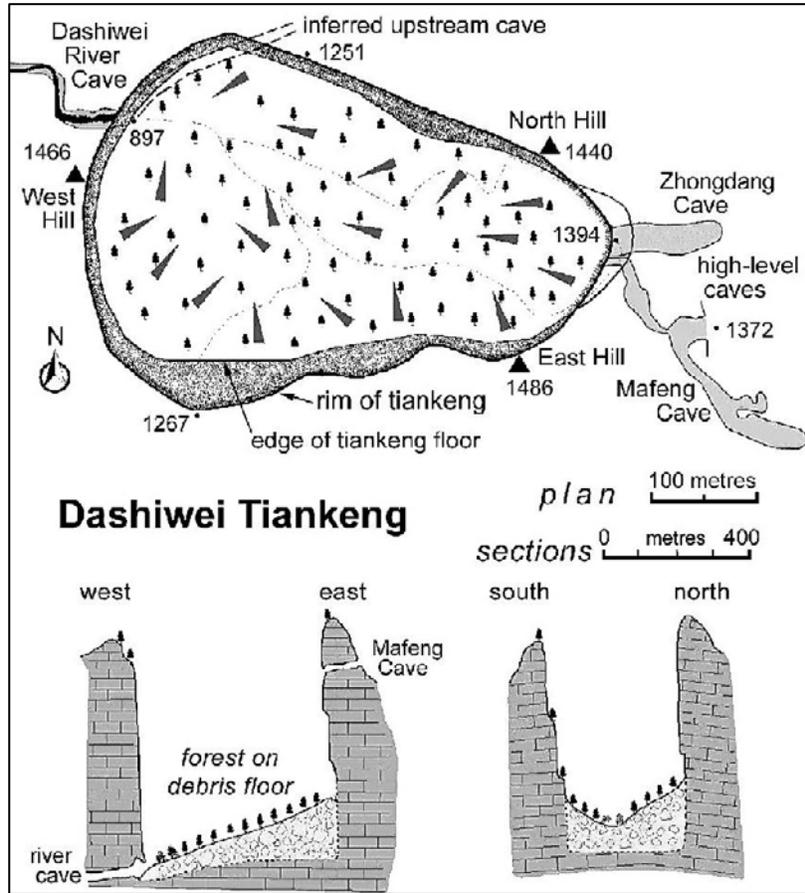


Figura 46. Plano y perfil del tiankeng de Dashiwei
 Reproducido de (Zhu, y otros, 2006)

La densidad y disposición espacial de las dolinas puede dar origen a diferentes paisajes kársticos (Tabla 12).

Tabla 12. Paisajes kársticos de dolinas

Elaborado con información de (Gutiérrez Elorza, 2008), (Gracia Prieto, 1991), (Ford, y otros, 2007) y (Fleurant, y otros, 2008)

| | |
|--|--|
| <i>Campo de dolinas</i> | Área de extensión variable (en general varios Km ²) en cuyo interior se observa una agrupación preferencial de dolinas con respecto a las áreas circundantes. Éstas se disponen como elementos aislados dispersos. |
| <i>Agrupaciones de dolinas</i> | Agrupaciones o clústeres dispersos de dolinas individuales. |
| <i>Karst poligonal, cockpit karst o fengcong</i> | Grupo de dolinas densamente empaquetadas, que se traducen en una sucesión de cumbres y depresiones kársticas de tamaño y posición irregular, en donde todos los interfluvios de las dolinas son pequeños, y que en conjunto simula una topografía en cartones de huevos. |
| <i>Valles de dolinas</i> | Cadenas de dolinas irregularmente separadas, dispuestas a lo largo de márgenes de recarga alogénica y sistemas de valles kársticos secos. |

Los *campos de dolinas*, en la mayoría de las ocasiones, presentan límites netos representados por un descenso muy brusco en la densidad de dolinas. Estos límites hablan de la existencia de factores secundarios propicios para el desarrollo de estas formas en zonas concretas de un macizo kárstico (Gracia Prieto, 1991). En la Figura 47 se muestra el mapa morfológico de un campo de dolinas sobre un macizo carbonatado.

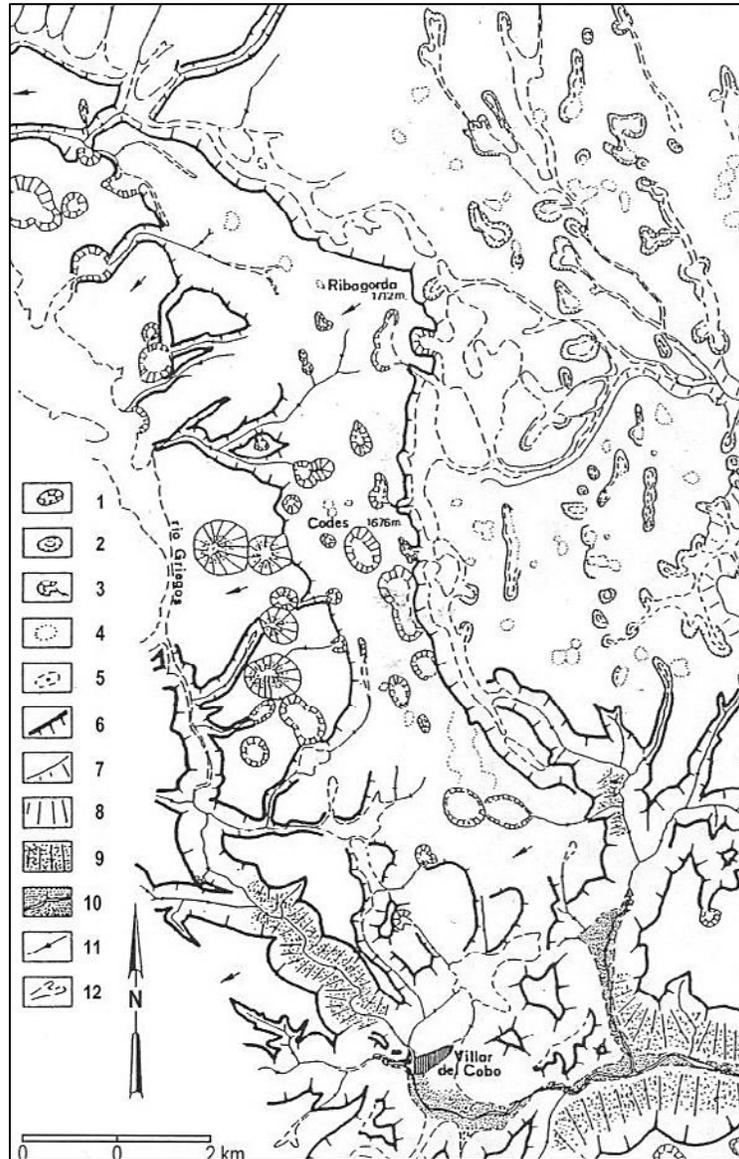


Figura 47. Agrupaciones de dolinas sobre carbonatos del Lias y Dogger en la región de Villar del Cobo, Cordillera Ibérica, España
 (Gutiérrez, y otros, (1979a) 2008)

1. Dolinas en embudo, 2. Dolinas en cubeta, 3. Dolinas capturadas, 4. Fondos de dolinas degradadas, 5. Sumidero, 6. Escarpes estructurales, 7. Escarpes no estructurales, 8. Vertientes regularizadas, 9. Grezes litéas, 10. Fondos aluviales, 11. Barrancos de incisión lineal, 12. Barrancos de fondo plano.

El *karst poligonal* o *cockpit karst* se caracteriza por la presencia de depresiones densamente empaquetadas o unidas, de tal manera que todo el paisaje kárstico, incluyendo las colinas residuales que constituyen las divisorias poligonales, es consumido por ellas, y la proporción entre el área con depresiones cerradas y el área karstificada se aproxima a la unidad (Williams, y otros, (1971;1988) 2004). Comprende dolinas de disolución principalmente, como en el cockpit karst de Jamaica (**Figura 49**), sin embargo también hacen acto de presencia las dolinas enterradas y de colapso (Ford, y otros, 2007), dependiendo de las condiciones particulares del área. Las divisorias implicadas en forma de malla celular constituyen un sistema de drenaje altamente eficiente, ya que, al acortar la distancia de la divisoria al centro de la dolina, se ve aumentada la transmisibilidad de la lluvia desde la superficie hacia el *epikarst*⁹⁰ o zona subcutánea.

⁹⁰ Zona más erosionada de la roca caliza cercana a la superficie (Ford, y otros, 2007).

Este tipo de paisaje kárstico fue reconocido por primera vez en Papúa Nueva Guinea (Williams, 1972) (**Figura 48**), pero también se encuentra en otros karsts carbonatados de zonas tropicales húmedas y templadas, incluyendo áreas del Caribe como Jamaica (**Figura 49** y **Figura 50**), y partes de Estados Unidos, Nueva Zelanda, Tasmania, China (**Figura 45**), Herzegovina, Turquía (Ford, y otros, 2007) e Indonesia (Haryono, y otros, 2004) (**Figura 51** y **Figura 52**).



Figura 48. Imagen de satélite de las montañas Darai en el karst poligonal de Papúa Nueva Guinea
 Reproducido de (Google Inc., 2011)

El karst poligonal calizo presenta diferentes tamaños de malla (Ford, y otros, 2007) (**Figura 53**). Por ejemplo, en la región de Guilin en China los polígonos tienen un área promedio de 0.51 Km², mientras que en la región de Waitomo en Nueva Zelanda alcanzan apenas un área de 0.018 Km² (Williams, (1993) 2007). El radio promedio de las depresiones es de 400 y 64 m, respectivamente, y el relieve interno de 200 m a 64 m en ambos casos (Ford, y otros, 2007). Ford y Williams (2007) afirman que, en ausencia de suelos volcánicos espesos, la geometría de la superficie kárstica refleja el balance entre la tasa de recarga y el régimen de rendimiento, este último controlado por la conductividad hidráulica vertical del lecho rocoso. A su vez, explican que en el caso de la región de Guilin, este balance es bajo debido a la naturaleza masiva y poco diaclasada de la roca, y al drenaje ampliamente espaciado; mientras que en Waitomo resulta ser muy alto, a razón de la fina estratificación y diaclasado intenso en la roca.

Este paisaje kárstico también se caracteriza por la presencia de colinas residuales coronando las divisorias poligonales, asumiendo una gran variedad de formas en el rango de hemisférica, cónica y piramidal (Balazs, y otros, (1973;1978) 2007). Estas en particular reflejan los atributos estructurales del lecho rocoso. Así, los diferentes estilos y tamaños de dolinas y colinas residuales confieren un carácter único a las áreas en donde éstas se encuentran (Ford, y otros, 2007).



Figura 49. Vista aérea oblicua del karst poligonal de la región de Cockpit, Jamaica
Reproducido de (Cockpit Country Stakeholders Group, 2006)

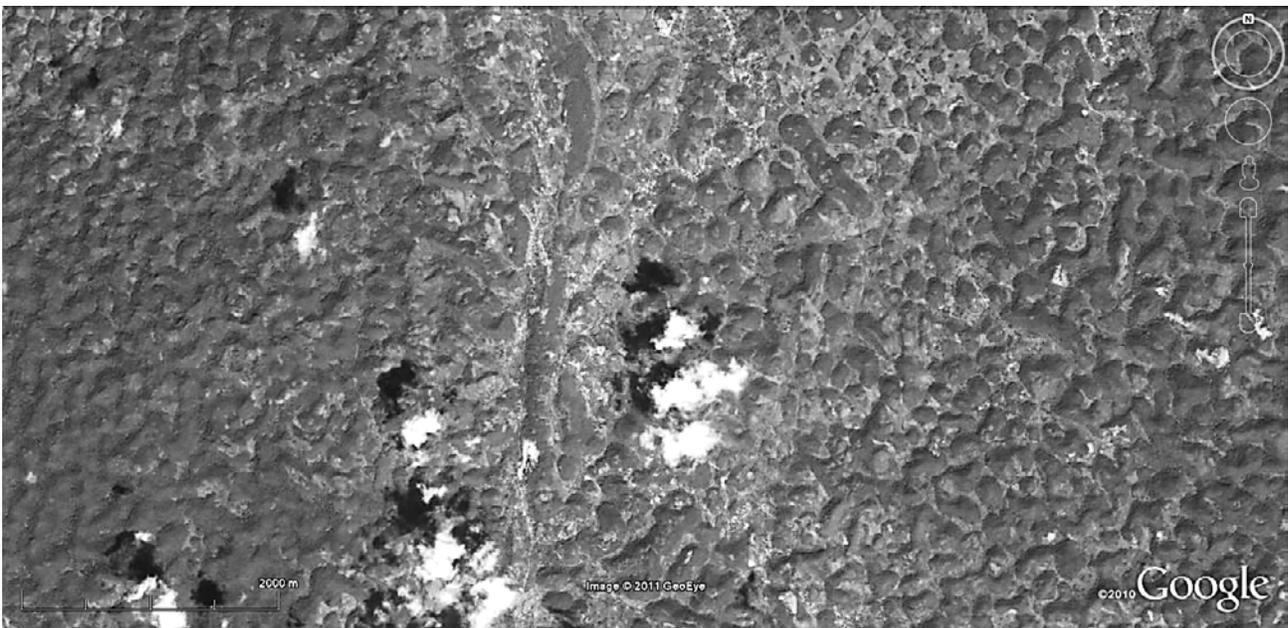


Figura 50. Imagen de satélite del karst poligonal al Este de la región de Cockpit, Jamaica
Reproducido de (Google Inc., 2011)

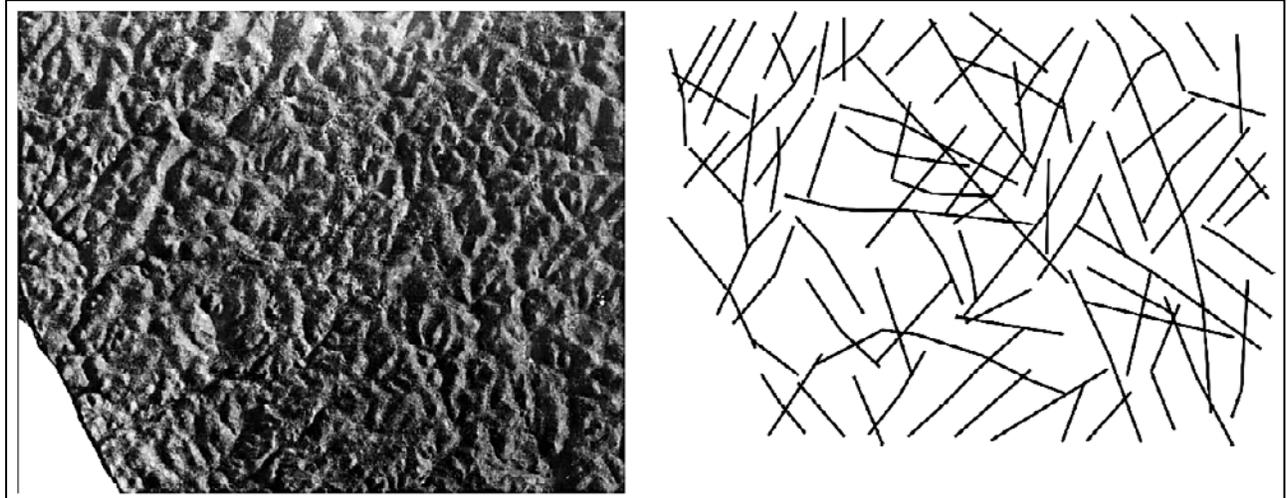


Figura 51. Fotografía aérea y lineamientos visibles del karst poligonal de Gunung Kidul, Indonesia
(Haryono, y otros, 2004)



Figura 52. Karst poligonal de Gunung Kidul, Indonesia
Reproducido de (Haryono, y otros, 2004)

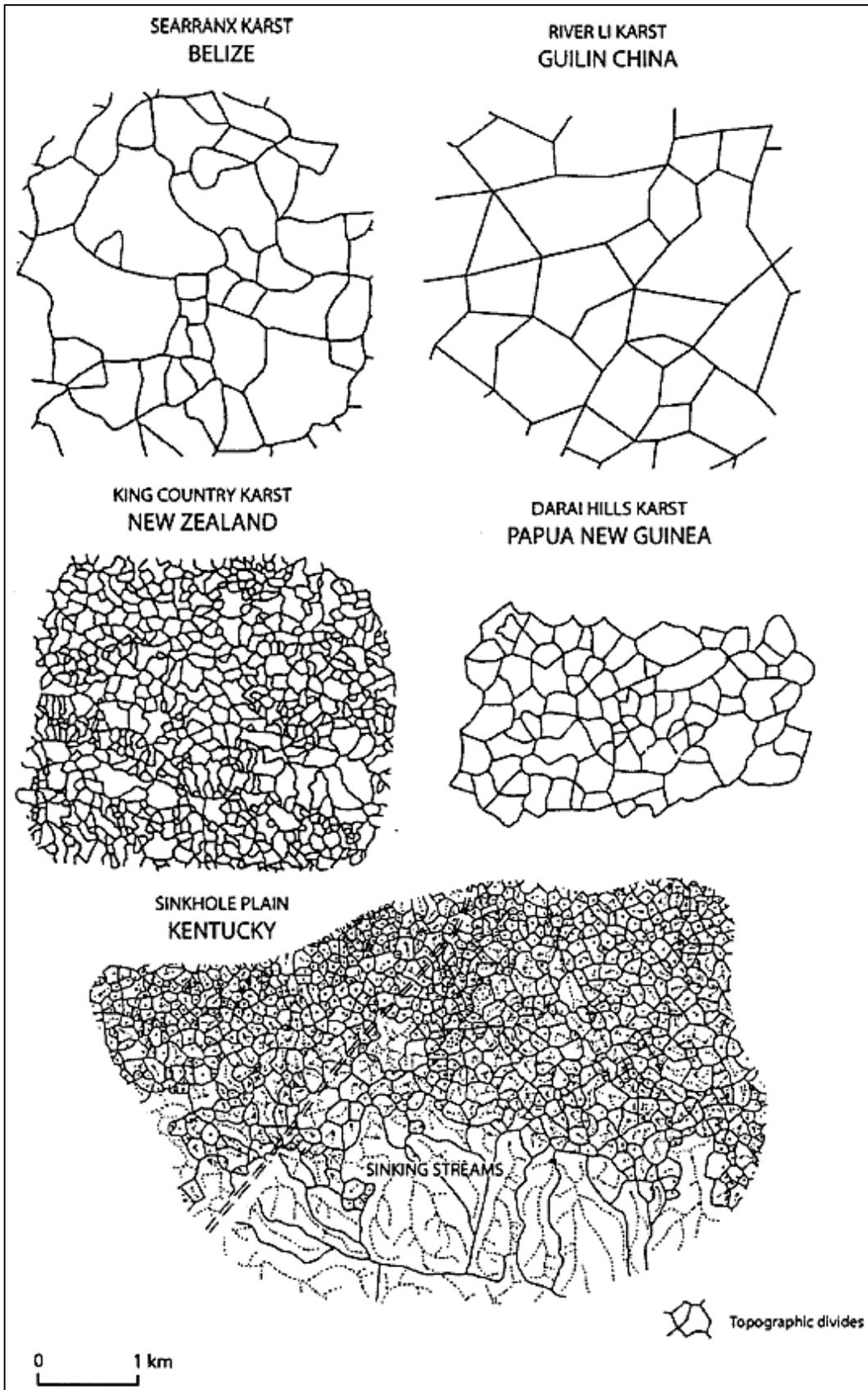


Figura 53. Comparación de texturas de karst poligonal de diferentes paisajes kársticos (Williams, (2004a) 2007)

Un ejemplo de *valles de dolinas* es el de la meseta kárstica de Zece Hotare en Rumania, donde varias dolinas se encuentran alineadas a lo largo de los valles secos, y otras tantas formando grupos o uvalas sobre la superficie de la meseta (Ford, y otros, 2007) (**Figura 54**).

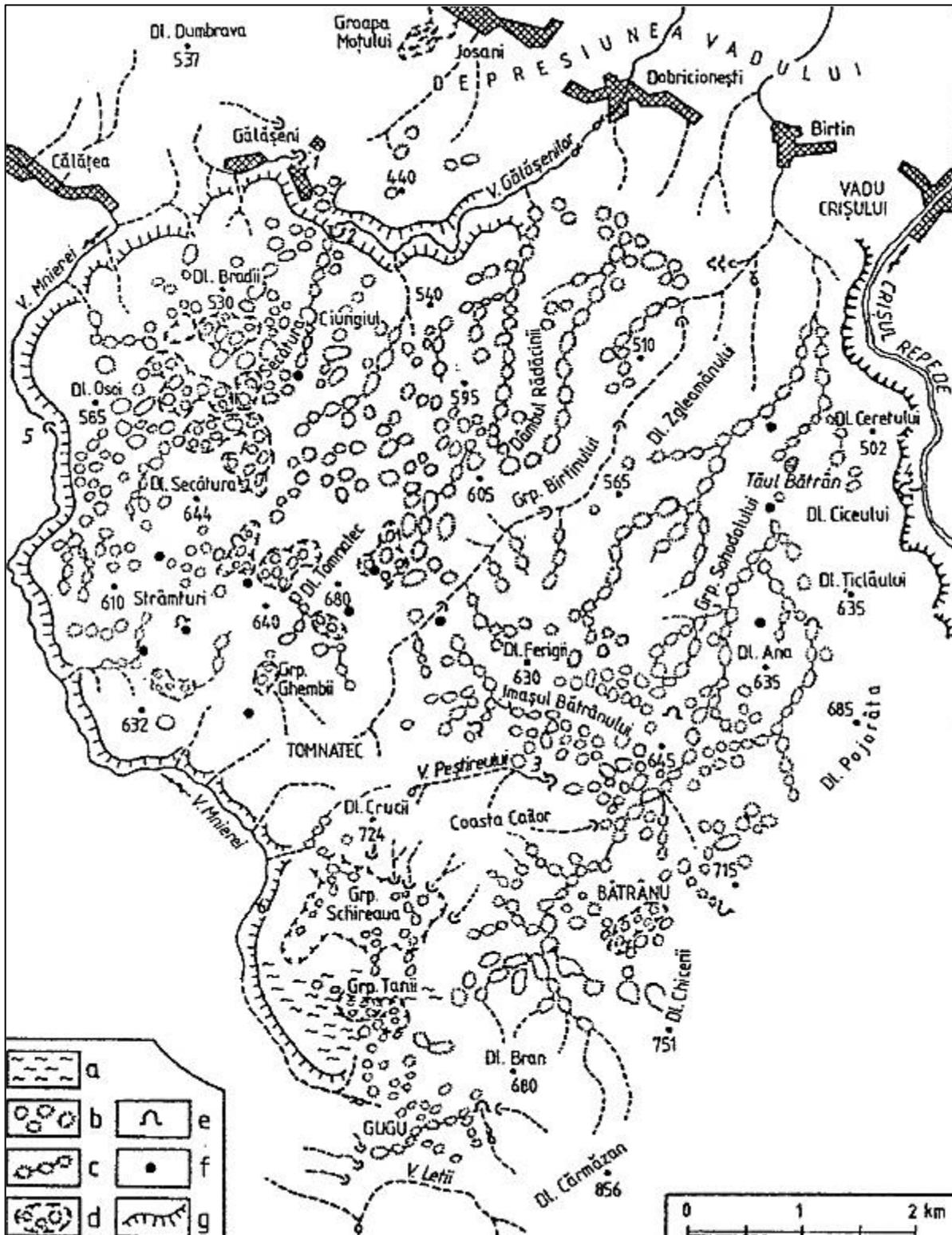


Figura 54. Karst de la meseta kárstica de Zece Hotare en Rumania
 (Racovita, y otros, (2002) 2007)

a. Karrenfeld, b. Dolina, c. Valle de dolinas, d. Uvala, e. Cueva, f. Eje de Poza, g. Limite de la meseta

3.3.1.3 VALLES, GARGANTAS Y FUENTES KÁRSTICOS

Los *valles kársticos* corresponden a formas de incisión fluvial en zonas kársticas (Pedraza Gilsanz, 1996). Cvijic (1893) y Sweeting (1972) diferencian cinco tipos de valles kársticos: *valles alógenos*, *ciegos*, *semiciegos*, *de cabecera escarpada (pocket valleys)*, y *secos*. A su vez los valles ciegos y secos se subdividen en *valles primarios*, formados por ríos alógenos que fluyen desde una roca impermeable, y *valles secundarios*, formados en el lecho de un río kárstico normal (Gunn, 2004). Aunque autores como Roglic (1964) y Sweeting (1972) han refutado la asociación de los valles con el karst verdadero, éste tipo de morfologías se consideran características de la mayoría de las regiones kársticas, e incluso pueden encontrarse vestigios de éstas en el karst poligonal (Gunn, 2004).

Los *valles alógenos*, como su nombre lo indica, proceden del exterior del macizo kárstico y sobreviven al karst sobre todo por su elevado caudal. Son estrechos y de vertientes escarpadas, formando *cañones* o *gargantas*, desarrollados a veces a favor de la fracturación (Gutiérrez Elorza, 2008). En ocasiones, las gargantas se originan por colapso de cavidades kársticas y pueden permanecer parte de las calizas de superficie, produciendo un *punte natural (Figura 56)*. Un ejemplo de valle alógeno es el Cañón del Sumidero en Chiapas (**Figura 55**), en donde el flujo constante y caudaloso del río Grijalva, ha modelado una enorme garganta de *sumidero*⁹¹, producto de la disolución, erosión fluvial y colapsos subsecuentes.



Figura 56. Puente natural en una garganta producida por colapso de caverna, Guizhou, China
(Ford, y otros, 2007)



Figura 55. Cañón del Sumidero en Chiapas, México
Fotografía de campo

La respuesta morfológica a la recarga hídrica, o en otras palabras, el alcance horizontal y la profundidad de estos valles dependen de la diferencia vertical entre el punto de entrada (contacto geológico) y salida de la corriente, y la intensidad del flujo hídrico. Varios ríos efluentes de carácter alógeno y perenne, al atravesar completamente el macizo kárstico, adquieren una función morfológica importante, ya que actúan como nivel base regional (Ford, y otros, 2007). En la **Figura 57** se muestra un ejemplo de la variación en la distancia de penetración de los ríos

⁹¹ Conductos verticales o muy inclinados que suponen la conexión entre las aguas superficiales y subterráneas (Pedraza Gilsanz, 1996).

forma de anfiteatro, o bien, un *valle de cabecera escarpada*. Así, estas geoformas se caracterizan en general por una resurgencia kárstica al pie del conjunto carbonatado. Suelen ser fuentes de gran caudal, en las que nace un río (Gutiérrez Elorza, 2008).

Asociados a los valles de cabecera escarpada se encuentran las *planicies kársticas marginales*, *planicies de corrosión* a nivel freático, producto de la unión de valles vecinos tras una denudación prolongada. Dichas planicies pueden ser tanto autogénicas como alogénicas (Ford, y otros, 2007).

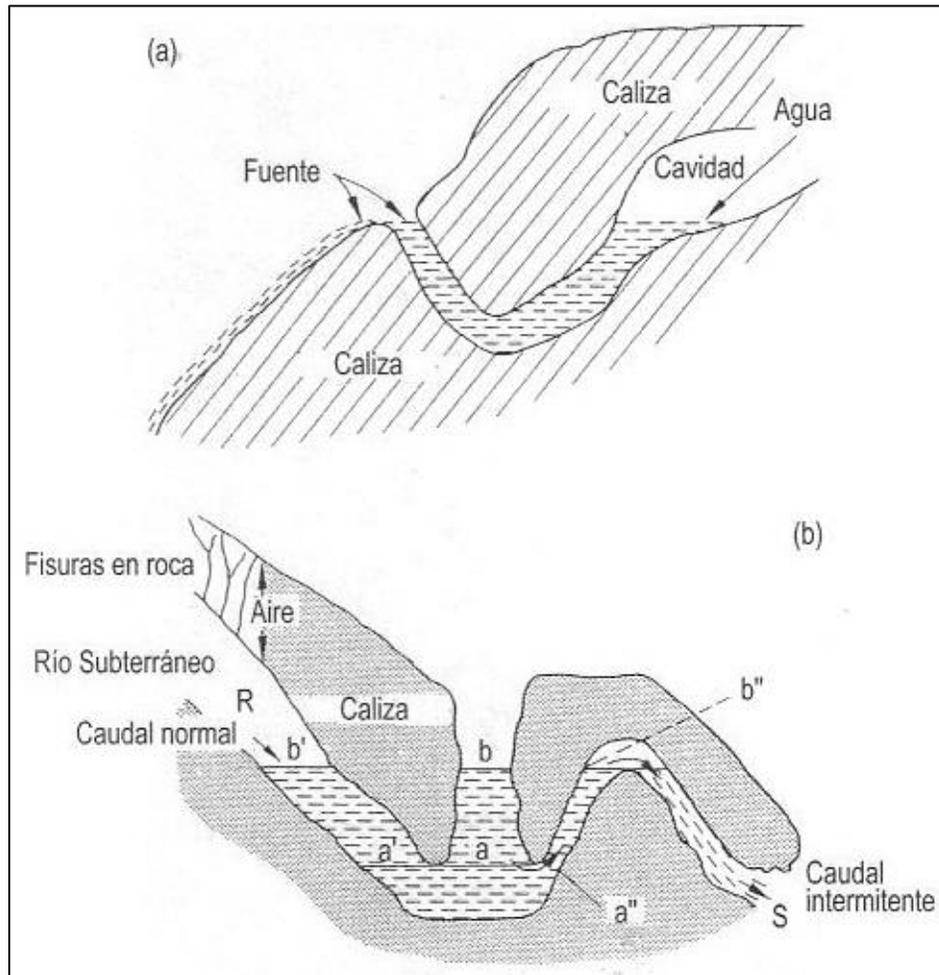


Figura 58. (a) Fuente vaclusiana. (b) Fuente intermitente
 (Trombe, (1952) 2008)

Los *valles secos* carecen de canales fluviales en su lecho (**Figura 59**). Se encuentran en varias litologías, pero fundamentalmente en las cabeceras de la red fluvial. Una excepción, son los valles secos formados a consecuencia de la captura de un río, proceso que puede ocurrir en cualquier litología. En varias áreas kársticas es posible encontrar valles secos largos y bien desarrollados, particularmente donde existen o existieron corrientes alógenas, comúnmente similares en forma a los valles alógenos (Gunn, 2004). En las calizas presentan laderas escarpadas y fondos planos (Gutiérrez Elorza, 2008). Por lo general, estos valles son lugares favorables para el desarrollo de dolinas (**Figura 54**), debido a que el agua disuelve por fisuración la caliza en estas zonas semiconfinadas (Sweeting, (1972) 2008). Así, pasado cierto tiempo, los valles secos pueden verse karstificados y perder completamente su morfología fluvial. Alternativamente, un incremento substancial en la descarga superficial, a consecuencia de un cambio climático o por el bloqueo de los conductos subterráneos por deposición de sedimentos, puede resultar en la reactivación de valles secos relicto (Gunn, 2004).



Figura 59. Valle kárstico seco, Lathkill Dale en el fluviokarst de Peak District, Inglaterra
 (Gunn, 2004)

Por tanto, dichas morfologías pueden tener orígenes muy diversos (Gunn, (2004b) 2008) (Gunn, 2004):

- 1) Distintos climas en el pasado, bien con mayor precipitación o permafrost.
- 2) Superposición de estratos no kársticos junto con karstificación del drenaje.
- 3) Descenso del nivel freático debido a un levantamiento e incisión de los valles principales o recesión del escarpe.
- 4) Deseccación progresiva de un valle alógeno por migración río arriba del punto de captación.

En el paisaje, y en ciertas ocasiones, la densidad de valles kársticos puede superar a la de otras formas de disolución, de manera que la superficie es disectada por una densa red de sistemas de valles formando un *fluviokarst* (Gunn, 2004) (véase **3.2.1.2** y **3.2.1.11**). Con base en criterios evolutivos, morfológicos y genéticos, los paisajes kársticos asociados en su mayoría con valles de incisión fluvial pueden clasificarse en:

Tabla 13. Paisajes kársticos de valle
 Elaborado con información de (Ford, y otros, 2007) y (Gunn, 2004)

| Etapa evolutiva | Morfología dominante | Origen |
|----------------------------|--|-------------------------------|
| <i>Fluviokarst activo</i> | <i>de valles alógenos</i> | <i>o alogénico</i> |
| | <i>de valles ciegos y semiciegos</i> | <i>alogénico o autogénico</i> |
| | <i>de valles de cabecera escarpada</i> | <i>autogénico</i> |
| <i>Fluviokarst relicto</i> | <i>o de valles secos</i> | <i>alogénico o autogénico</i> |

El *fluviokarst activo* se caracteriza por la presencia de flujo hídrico superficial, ya sea perenne o intermitente. Su ocurrencia requiere dos condiciones específicas. Primero, un desarrollo kárstico incipiente y/o un gradiente hidráulico muy bajo, en donde el sistema de conductos kársticos no es capaz de drenar toda la superficie, dejando canales expuestos, por lo menos en las cabeceras. Segundo, en las regiones secas se encuentra sujeto a lluvias torrenciales de temporada, las cuales con el tiempo modelan valles con patrones dendríticos coronando las rocas kársticas y drenando

hacia su perímetro (Gunn, 2004). En la **Figura 57** se muestra un ejemplo de *fluviokarst activo de valles alógenos*. La **Figura 60** provee un interesante ejemplo de *fluviokarst activo de valles de cabecera escarpada* en Francia.

Por su parte, el *fluviokarst relicto* o *fluviokarst de valles secos* es un paisaje kárstico dominado por valles secos, completamente separado de la red fluvial activa (Pedraza Gilsanz, 1996). Estos paisajes son más comunes que los fluviokarsts activos (Gunn, 2004). El sistema de valles secos en las calizas carboníferas de Derbyshire, Reino Unido (**Figura 61**) y el karst de Guizhou, China (**Figura 62**), son claros ejemplos de *fluviokarst relicto autogénico*.

Cuando en un mismo paisaje se presentan diferentes morfologías fluviokársticas, o cuando el fluviokarst activo y el relicto comparten la misma área, se puede hablar de un *fluviokarst mixto*. En función del origen del flujo hídrico que modeló el paisaje, se puede diferenciar el *fluviokarst alogénico* del *fluviokarst autogénico*.

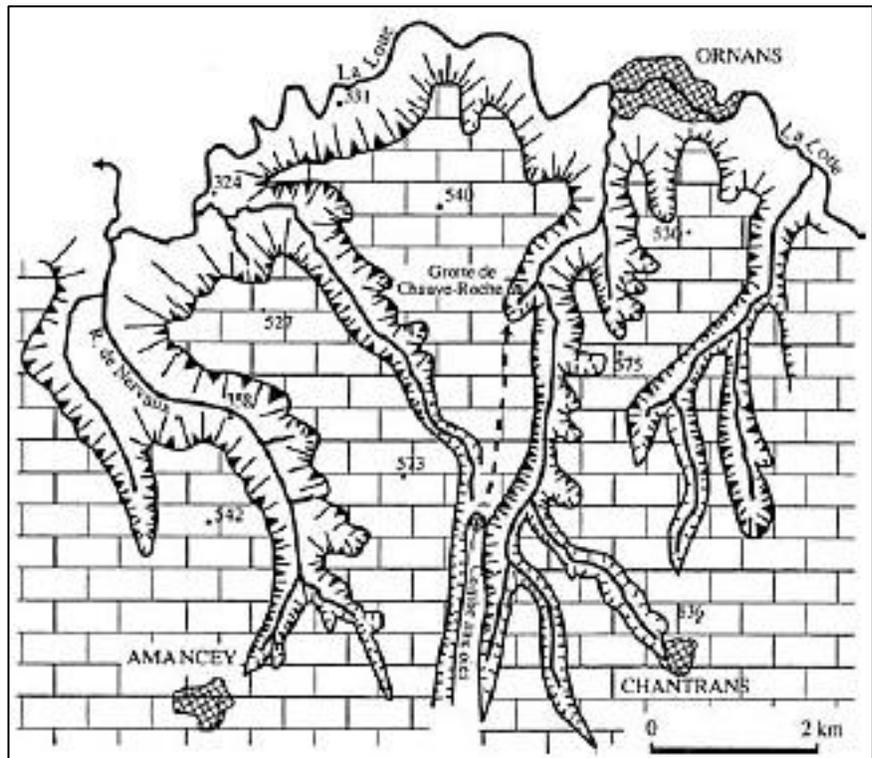


Figura 60. Valles de cabecera escarpada en las márgenes de una meseta kárstica en Francia (Salomón, (2000) 2007)

Se considerarse que en macizos calizos relativamente delgados, en donde fluyen numerosos ríos alógenos, la karstificación resulta en un paisaje dominado por valles ciegos y alógenos con dolinas en los interfluvios. Por el contrario, en macizos calizos gruesos con una menor proporción de ríos alógenos, el paisaje evoluciona en una red de valles con patrón dendrítico. Finalmente, las calizas con alto grado de impureza, presentan menor densidad de dolinas pequeñas y mayor desarrollo fluviokárstico (Ford, y otros, 2007).

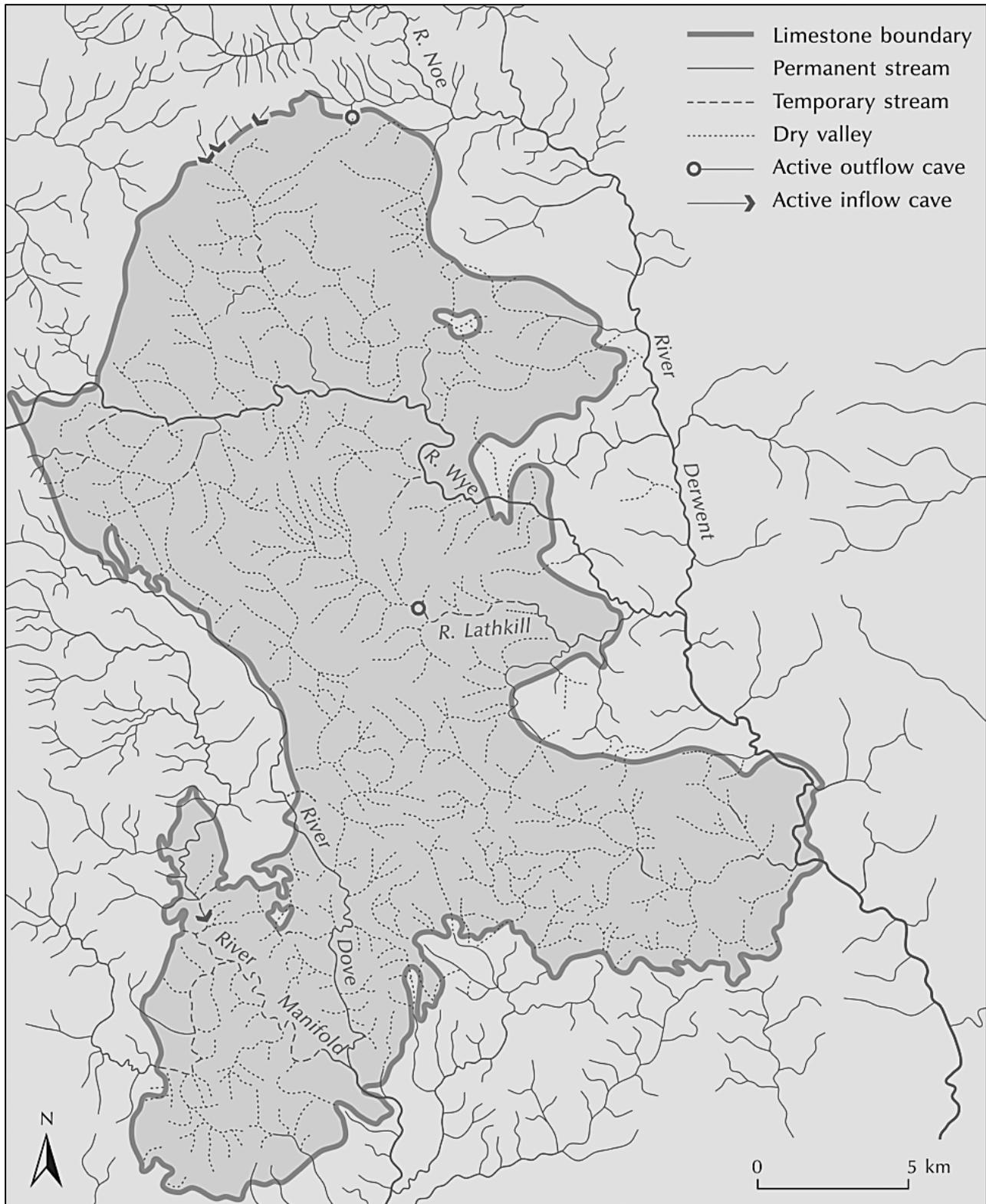


Figura 61. Fluviokarst relicto autogénico. Sistema de valles secos en las calizas carboníferas de Derbyshire, Reino Unido (Huggett, 2011)

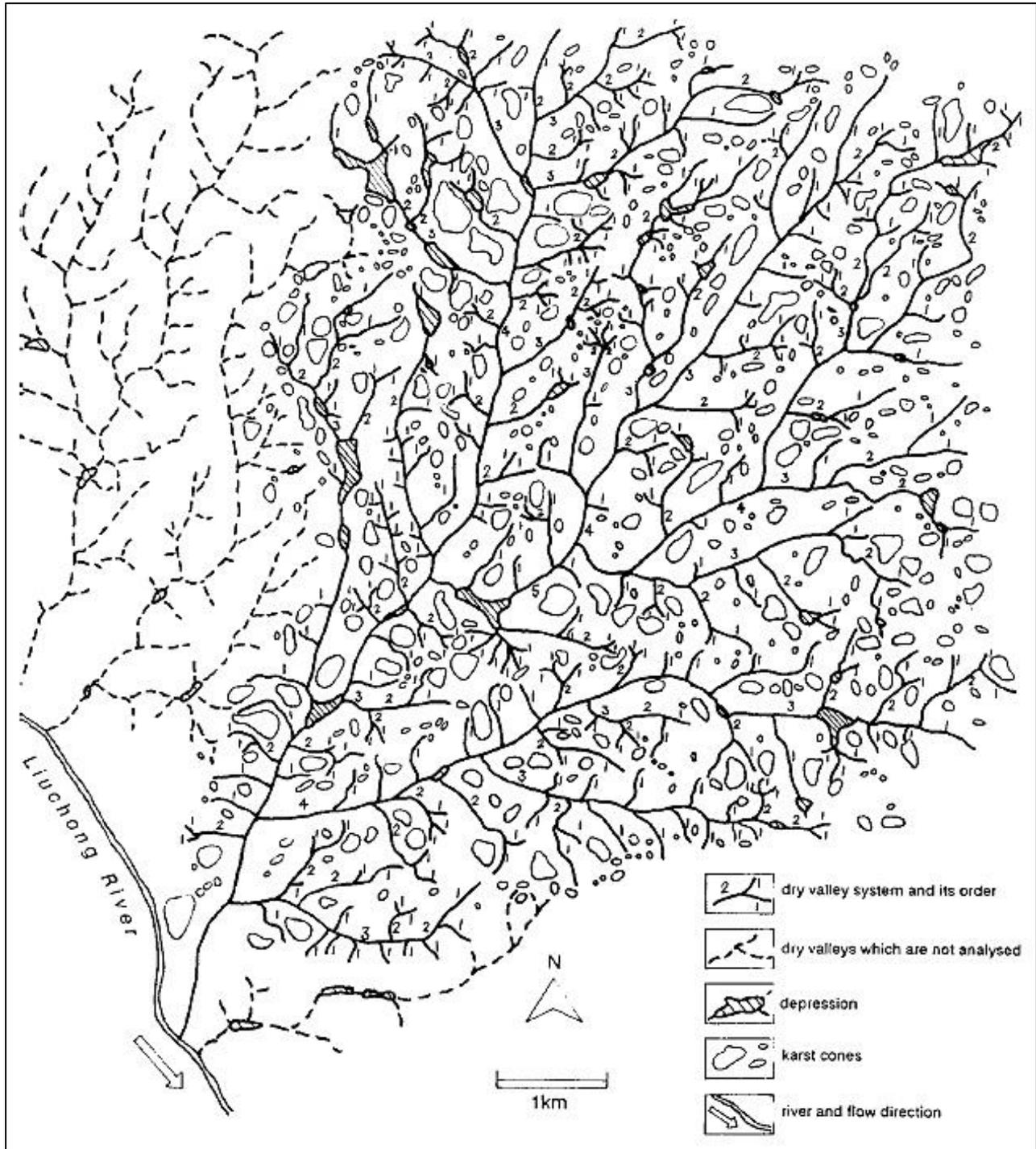


Figura 62. Mapa morfológico mostrando la asociación de conos kársticos con interfluvios de valles secos, a lo largo de suelos donde se presentan depresiones kársticas (Tan, (1992) 2007)

3.3.1.4 POLJES

Los *poljes* son grandes depresiones cerradas de suelo plano, presentes en terrenos kársticos tropicales, templados, e incluso, subárticos (Brook, y otros, (1980) 2007) (Figura 63). Son geofomas poligenéticas asociadas a corrientes de entrada y transición en el sistema kárstico (Sauro, (2005) 2008) (Ford, y otros, 2007), pueden ser secos, tener un curso de agua o estar inundados en forma permanente o temporal (Lugo Hubp, 1989). Con relativa frecuencia destacan,

sobre los fondos aplanados de los poljes, morfologías más elevadas que se denominan *hums* (Gutiérrez Elorza, 2008). Los poljes varían considerablemente en tamaño, y en el mundo la mayoría de ellos tienen menos de 10 Km² (Ford, y otros, 2007). Gams (1978) identifica tres características inherentes a los poljes (Ford, y otros, 2007):

1. Suelo plano en la roca (o también con terrazas) o en sedimentos no consolidados como el aluvión.
2. Cuenca cerrada con pendientes marginales abruptas al menos en un lado.
3. Drenaje kárstico.

El desarrollo de todos los poljes tiene lugar cerca del nivel freático local, incluso aunque éste sea alzado y eventos subsecuentes (como levantamiento y karstificación) los alejen de dicho nivel freático. En casos donde el nivel freático tiene un gradiente bajo y se encuentra cerca de la superficie, los procesos de aplanamiento fluvial lateral (corrosión y corrosión) y deposición son más importantes que la incisión; por tanto, es más frecuente la formación de planicies que la de valles profundos. Ambos procesos, tectónica y aplanamiento por disolución kárstica, son importantes para el desarrollo de poljes (Ford, y otros, 2007).



Figura 63. Típico polje de las regiones kársticas de Guizhou, China
Reproducido de (Karst Scientific Data Center, 2007)

Ford y Williams (2007) clasifican los poljes en tres tipos básicos: *polje de borde*, *polje estructural*, y *polje de nivel base* (**Figura 64**).

Los *poljes de borde* son controlados por corrientes alógenas. Se desarrollan en áreas donde la fluctuación del nivel freático de rocas no kársticas se extiende sobre la caliza, lo que asegura que

la actividad fluvial alógena sea mantenida en superficie y que el aplanamiento lateral y el depósito de aluvión sean los procesos dominantes. En ciertos casos, los depósitos de la llanura de inundación pueden sellar parcialmente el lecho calizo, hecho que contribuye en mantener el agua cerca de la superficie. Estos poljes se desarrollan comúnmente a lo largo de contactos geológicos (Ford, y otros, 2007).

Otro tipo de poljes, son los controlados por el lecho geológico. Así, los *poljes estructurales*, se asocian a menudo con *grabens* (véase 2.5.1.1.2) o depresiones de falla angular, y con lechos rocosos impermeables o poco permeables (Ford, y otros, 2007). Estas geformas aplanadas se extienden a lo largo de grandes fracturas o fallas (Lugo Hubp, 1989). Debido a la baja permeabilidad del enclave, el nivel freático se mantiene cerca de la superficie, sin embargo, cuando el gradiente hidráulico aumenta, el agua alcanza los bordes kársticos y se infiltra a través de *ponors* (oquedades profundas) (Figura 38) (Ford, y otros, 2007) (Gutiérrez Elorza, 2008).

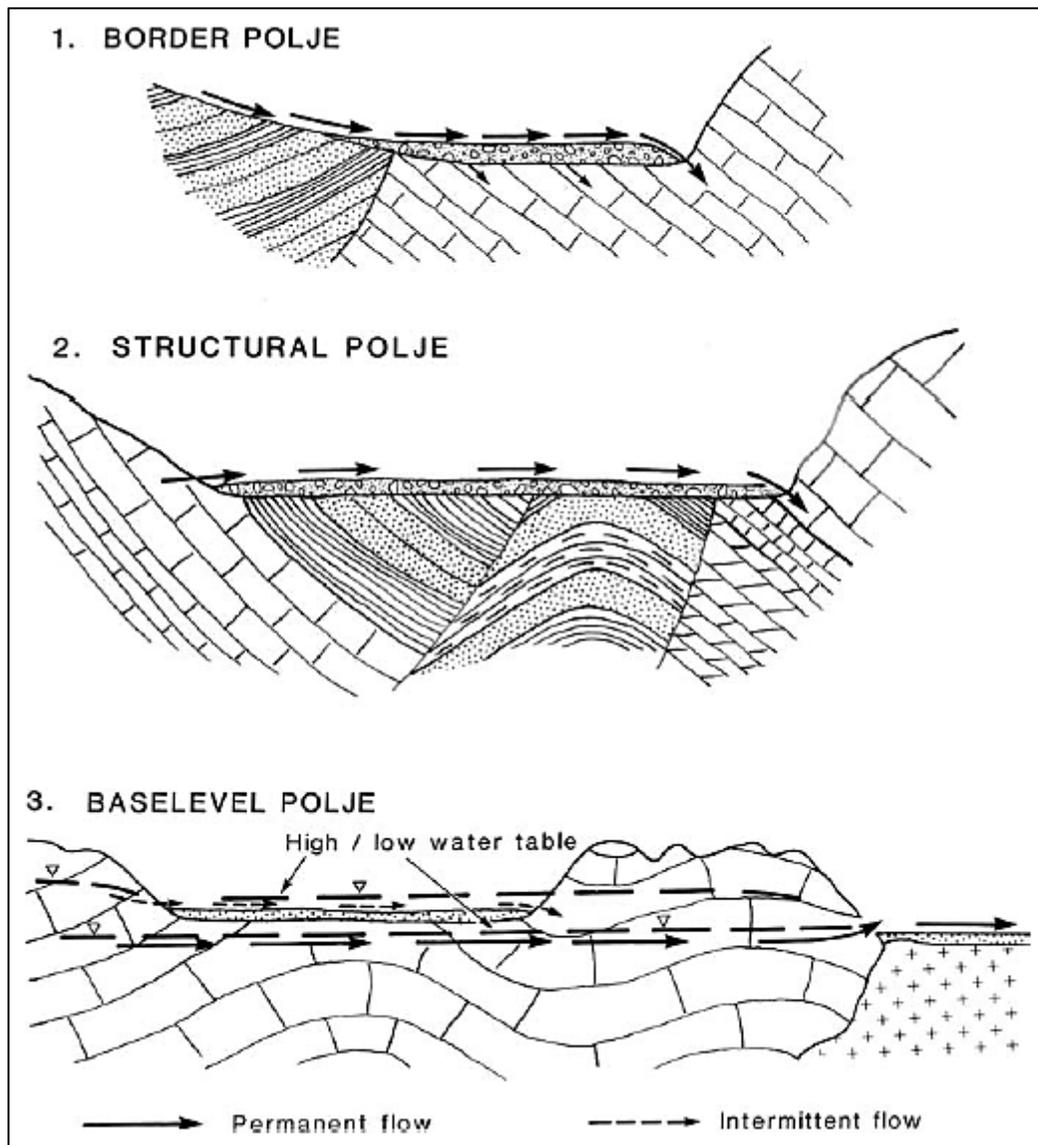


Figura 64. Tipos fundamentales de Poljes
 (Ford, y otros, 2007)

El tercer y último tipo de polje son los denominados *poljes de nivel base*. Controladas por el nivel freático, estas morfologías tienen lugar donde la superficie de disolución kárstica ha

descendido hasta la zona epifreática local; o en otras palabras, constituyen ventanas en el nivel freático. Son formas típicas de salida en los sistemas kársticos. Por su naturaleza, los poljes de nivel base pueden desarrollarse en escenarios totalmente autogénicos, y a su vez extenderse fuera de sus límites a través de mares u otras formaciones impermeables. Los episodios de inundación extrema aceleran el ritmo de expansión lateral, y son característicos de varios poljes tropicales y templados. Las terrazas aluviales y de corrosión en los poljes son evidencia de estos fenómenos, frecuentemente asociados a cambios climáticos (Ford, y otros, 2007).

Estas geoformas pueden presentarse como elementos morfológicos subdominantes dentro del paisaje kárstico (**Figura 63**), o bien, como sistemas de poljes, abarcando la mayoría del paisaje, como en la región de Layna, España (Gracia, y otros, 1996). Así, con base en su naturaleza estructural y presencial, y dependiendo de la escala de estudio, los paisajes kársticos de polje pueden clasificarse en:

Tabla 14. Paisajes kársticos de polje
 Elaborado con información de (Ford, y otros, 2007) y (Gutiérrez Elorza, 2008)

| Paisaje kárstico | Tipo de polje | Número de poljes |
|-----------------------------|----------------------|------------------|
| <i>Poljekarst simple</i> | <i>de borde</i> | 1 |
| | <i>estructural</i> | |
| | <i>de nivel base</i> | |
| <i>Poljekarst compuesto</i> | <i>de borde</i> | ≥2 |
| | <i>estructural</i> | |
| | <i>de nivel base</i> | |
| | <i>mixto</i> | |

El estudio de los poljes puede aportar información valiosa, por ejemplo, en cuanto a la relación cronológica del inicio de generación del polje con la superficie de erosión regional; la reconstrucción de la evolución paleohidrológica de los sistemas kársticos a medida que los poljes van evolucionando; y el uso de las superficies de aplanamiento kárstico que orlan los fondos de los poljes como marcadores para detectar deformaciones neotectónicas (Gracia, y otros, (2002) 2008).

3.3.1.5 PLANICIES DE CORROSIÓN KÁRSTICA Y CAMBIOS EN EL NIVEL BASE

Las *planicies de corrosión kárstica* son las geoformas más planas de la Tierra, producidas por procesos de denudación natural. Se asocian con las corrientes de salida de los terrenos kársticos y (a pequeña escala) con terrazas de corrosión y poljes. También son producto de largos periodos de denudación en las márgenes de entrada. Cuando un *polje de borde* (**Figura 38**) se conecta con una planicie de corrosión marginal, resulta en una extensa superficie de corrosión con escaso relieve (Ford, y otros, 2007) (**Figura 65**).

Estas geoformas presentan comúnmente una capa superficial de aluvión, con grosor variable, sin embargo, en casos donde esta cubierta ha sido removida (por levantamiento, glaciación o extracción minera) es posible apreciar el lecho rocoso aplanado. En los trópicos en particular, este lecho puede estar diminutamente accidentado a causa del diaclasado superficial y extenderse a través de varios kilómetros cuadrados.

Una vez que la topografía es erosionada hasta la zona epifreática o nivel base, las planicies de corrosión se expanden por retiro gradual de las elevaciones kársticas colindantes, y por la eliminación de *colinas residuales*. Las pendientes bajas (<0.1°), propias de estas planicies, y el pobre gradiente hidráulico, restringen toda actividad disolutiva a los residuos insolubles y a las escasas depresiones (Ford, y otros, 2007).



Figura 65. Tierras bajas de Gort, extensa planicie de corrosión kárstica de nivel base sobre calizas plegadas del Carbonífero, al oeste de Irlanda
 (Ford, y otros, 2007)

El complejo de procesos que origina las *planicies de corrosión kárstica* es el *aplanamiento por corrosión*. Dicho complejo envuelve una combinación de a) disolución vertical de remanentes en pie por lluvia directa, b) socavación lateral de colinas por corrosión acelerada en las zonas pantanosas de sus bases, c) socavación de las cabeceras de mananciales. La importancia relativa de estas tres actividades depende de circunstancias tanto hidrogeológicas como biogeográficas, las cuales controlan la deposición de aluvión y la agresividad del agua (véase **3.2.1.9**) y éstas, a su vez, influyen en la permeabilidad de la superficie (Ford, y otros, 2007). Son precisamente las condiciones ambientales del trópico húmedo las que permiten la denudación máxima del relieve kárstico, hasta el punto de alcanzar la zona epifreática.

Si bien se ha corroborado la importancia del nivel base de erosión para el desarrollo del paisaje kárstico en general, es indispensable comprender los factores que determinan su altitud y/o profundidad. Se conoce que el sistema de circulación kárstica está sujeto a un proceso de autoajuste continuo, dependiente de la frecuencia de fisuras y del potencial hidráulico (Ford, y otros, 2007). Al respecto Ford y Williams (2007) afirman que:

1. El nivel base para el desarrollo de una planicie de corrosión es el nivel freático.
2. El nivel inferior de la corrosión activa varía de acuerdo (a) con el sistema de circulación kárstica, siendo más profundo en aquellas etapas en donde la frecuencia de fisuración es menor (b) con la edad (si la frecuencia de fisuras se incrementa, dicho nivel tenderá a ser menos profundo y (c) con la extensión de cualquier relleno clástico.

En cuanto a los efectos de la interface agua dulce-agua salada, Ford y Williams (2007) reconocen que la corrosión es considerable en la zona de mezcla.

El *rejuvenecimiento de la actividad erosiva*, y por ende el *karst rejuvenecido*, es consecuencia común de un cambio negativo en el nivel base, resultado del levantamiento tectónico o de la caída en el nivel del mar. El levantamiento de un karst bien desarrollado tiene tres efectos principales (Ford, y otros, 2007):

1. Los ríos alógenos mayores se atrincheran, produciendo valles profundos.

2. La zona vadosa se expande, pudiéndose posar por encima del fondo de los valles, dependiendo de la velocidad de atrincheramiento.
3. El nivel freático migra hacia abajo en la roca menos karstificada.

Una vez que el nivel freático cae por debajo de una planicie de corrosión levantada, la lluvia percolante puede escapar verticalmente. Las dolinas de disolución pueden incidir, y las dolinas de sufosión y colapso aparecen en las planicies aluviales. Toda colina residual se incorpora a los parteaguas formados por las dolinas en desarrollo. El rejuvenecimiento subterráneo (i.e. el desarrollo de una caverna multifase) es prerequisite para el rejuvenecimiento de la topografía superficial (Ford, y otros, 2007). La **Figura 66** representa esquemáticamente el rejuvenecimiento de un *karst de torres* que ha alcanzado el nivel freático (Ford, y otros, 2007). La **Figura 67** muestra una planicie de corrosión kárstica (con colinas residuales) levantada en la meseta de Guizhou, en un área aún afectada por la ola de rejuvenecimiento actual, la cual continúa trabajando cabeceras arriba en los barrancos vecinos (Ford, y otros, 2007). Otros ejemplos de planicies de corrosión kársticas levantadas y rejuvenecimiento erosivo, se encuentran a lo largo del río Hongshui (Guizhou, China), y en los cursos bajos de los ríos Cetina y Krka en Croacia (Ford, y otros, 2007).

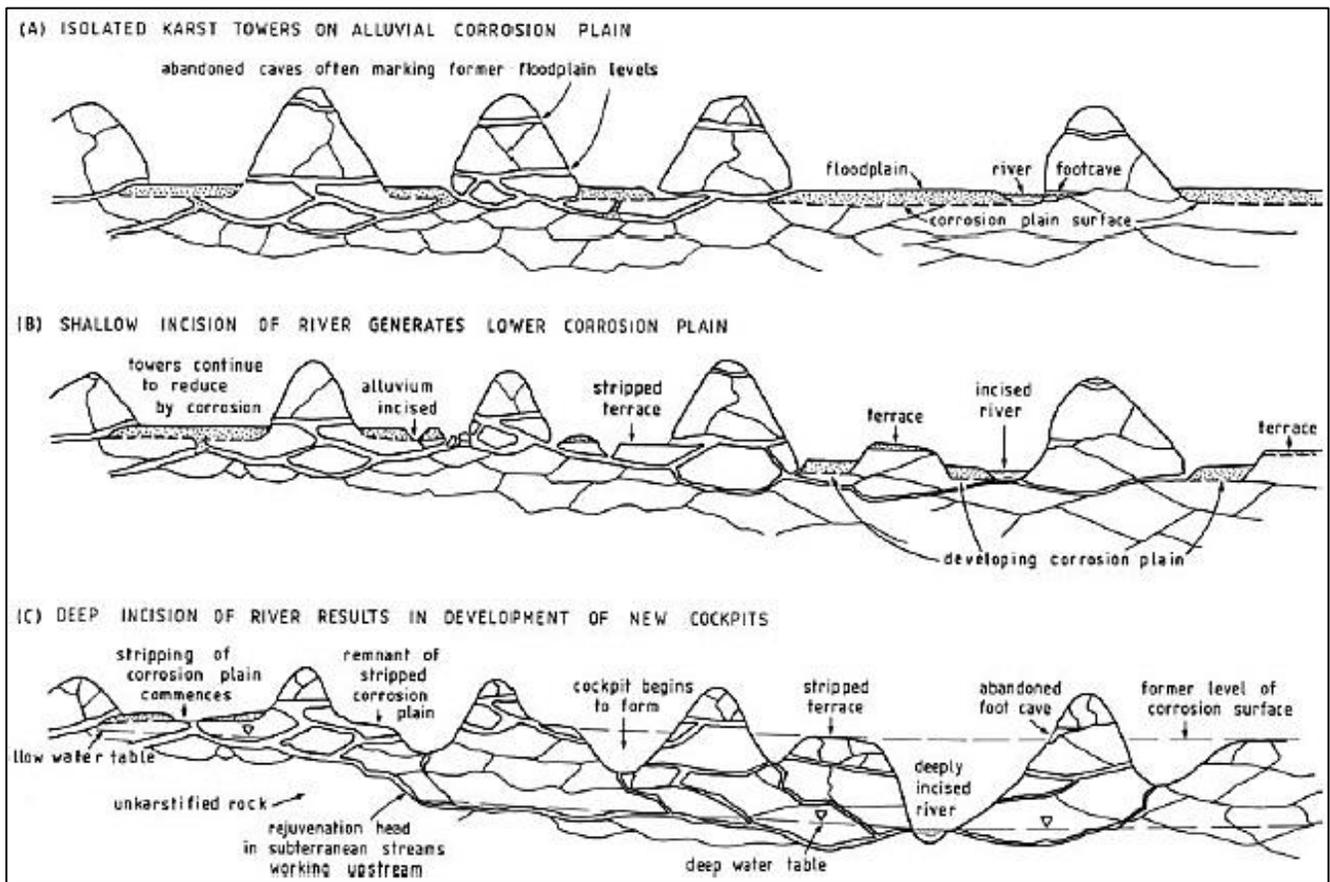


Figura 66. Neodesarrollo de karst poligonal por rejuvenecimiento de karst de torres
 (Ford, y otros, 2007)



Figura 67. Planicie de corrosión kárstica antigua con colinas residuales en la meseta de Guizhou, China, a 1200 m sobre el nivel del mar
 (Ford, y otros, 2007)

Por otra parte, se sabe que las transgresiones post-glaciales del Cuaternario, ocasionaron cambios positivos en el nivel base. Consecuentemente, los karsts cercanos al mar se han visto generalmente envueltos en una dinámica de respuesta a dichos cambios, trayendo consigo los siguientes efectos (Ford, y otros, 2007):

1. Contracción de la zona vadosa.
2. Expansión de zonas freáticas, con el posible aislamiento de las secciones más profundamente estancadas, de la capa activa de circulación subterránea.
3. Desplazamiento aguas arriba de la interface agua dulce-agua salada en la costa, y por tanto, de la zona de alta corrosión asociada.
4. Manantiales costeros ahogados, algunos de ellos demasiado sumergidos para operar.
5. Agradación de las tierras bajas costeras y relleno de cuevas por sedimentos marinos.

Además, la subsidencia tectónica también ha contribuido en la sumersión de algunos karsts. Ejemplos destacados de *karsts ahogados* o *sumergidos* se encuentran en las penínsulas de La Florida (Land, y otros, (2000) 2007) y Yucatán (Beddows, (2004) 2004), y en la bahía de Ha Long en Vietnam (Khang, (1991) 2007) (Waltham, y otros, (2004) 2004) (**Figura 68**). Las depresiones cerradas de piso plano, con paredes escarpadas y acantilados socavados por *muescas*⁹⁴, proporcionan evidencia de la acción de los procesos kársticos subaéreos⁹⁵, cuando los niveles del mar se encontraban a al menos 120 m de profundidad (Ford, y otros, 2007).

Como se ha expuesto, la respuesta del karst a los cambios en el nivel base, resulta en la formación de paisajes característicos. Por esta razón, tanto la estabilidad relativa en el nivel base como su dinámica, pueden ser tomados como criterios de clasificación del paisaje kárstico (**Tabla 15**).

⁹⁴ Concavidad o hueco (Real Academia Española, 2011).

⁹⁵ En contacto con el mar.



Figura 68. Karst de torres parcialmente sumergido, Bahía de Ha Long, Vietnam
 Reproducido de (Goway Travel, 2010)

Tabla 15. Paisajes kársticos según situación del nivel base
 Elaborado con información de (Ford, y otros, 2007)

| Paisaje kárstico | Situación del nivel base |
|---------------------------------------|--------------------------|
| <i>Planicie de corrosión kárstica</i> | Estable |
| <i>Karst rejuvenecido</i> | Cambio negativo |
| <i>Karst ahogado o sumergido</i> | Cambio positivo |

3.3.1.6 COLINAS KÁRSTICAS RESIDUALES Y FUNDAMENTACIÓN TAXONÓMICA

Existen diferentes propuestas para clasificar las colinas kársticas residuales: (Ford, y otros, 2007), (White, 1988), (Mateo Rodríguez, 1981), (Espinosa Pereña, 1990), (Díaz del Olmo, y otros, 2003), (Pedraza Gilsanz, 1996), (Lugo Hubp, 1989), (Day, (2004) 2004), entre otros autores. De igual manera, no existe una distinción definitiva en cuanto a los paisajes conformados en su mayoría por dichas geoformas (Nguyet, 2006).

De acuerdo con el sistema de clasificación geomorfológica general y jerarquización de categorías, desarrollado por Carvajal y otros (2004), la colina kárstica residual es catalogada como *unidad geomorfológica*, al igual que la dolina, polje, garganta y valle, entre otros. Esta categoría corresponde a los elementos básicos que componen un paisaje o modelo geomorfológico, los cuales están definidos con criterio genético, morfológico, y geométrico en función de la escala del proceso natural que los conformó (Carvajal, y otros, 2004).

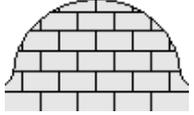
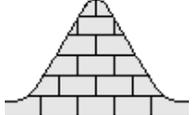
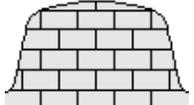
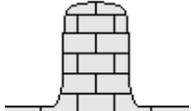
Así, con base en dicha clasificación, y en la generalidad de las propuestas karstológicas citadas, se establece la siguiente definición y la taxonomía correspondiente:

Las *colinas kársticas residuales* de las zonas tropicales, son restos calizos individuales⁹⁶ relativamente aislados⁹⁷, producto de la disolución diferencial, desarrollados tanto en planicies

⁹⁶ De una sola cima.

kársticas como en macizos calcáreos. Dichas colinas presentan una gran variedad de formas. En función de su morfología y geometría, éstas se clasifican en:

Tabla 16. Tipos fundamentales de colinas kársticas residuales de las zonas tropicales

| Geoforma | Características | Inclinación de laderas | Relación altura/anchura | Perfil |
|-------------------------------|--|------------------------|----------------------------|---|
| <i>Cúpula (kuppel, dome)</i> | Colina en forma de media esfera u otra aproximada, de trazado circular, con paredes curvas. | <i>variable</i> | <i>altura < anchura</i> |  |
| <i>Cono (kegel, cone)</i> | Geoforma de superficie triangular, curvada y cerrada que termina en vértice o punta roma, con base circular u otra aproximada. | < 60° | <i>altura < anchura</i> |  |
| <i>Mogote (hügel, antler)</i> | Monolito de paredes redondeadas y/o angulares, escarpadas y aproximadamente paralelas. | > 60° | <i>altura < anchura</i> |  |
| <i>Torre (turm, tower)</i> | | | <i>altura > anchura</i> |  |

(Peña Ramírez, 2012)

Los factores que influyen en el desarrollo de estas morfologías son muy diversos. La dirección y buzamiento de las capas, así como la fracturación, afectan al desarrollo de la forma, de tal manera que las colinas se alargan según la dirección, al igual que las depresiones existentes a su pie (dolinas, uvalas, poljes y valles) (Gutiérrez Elorza, 2008). A su vez, las colinas pueden alcanzar formas irregulares como consecuencia de un marcado desarrollo poligenético (erosión diferencial, levantamiento y hundimiento, entre otros factores). Como resultado, es muy común encontrar variantes asimétricas de los tipos fundamentales de colinas kársticas residuales (**Figura 69**).

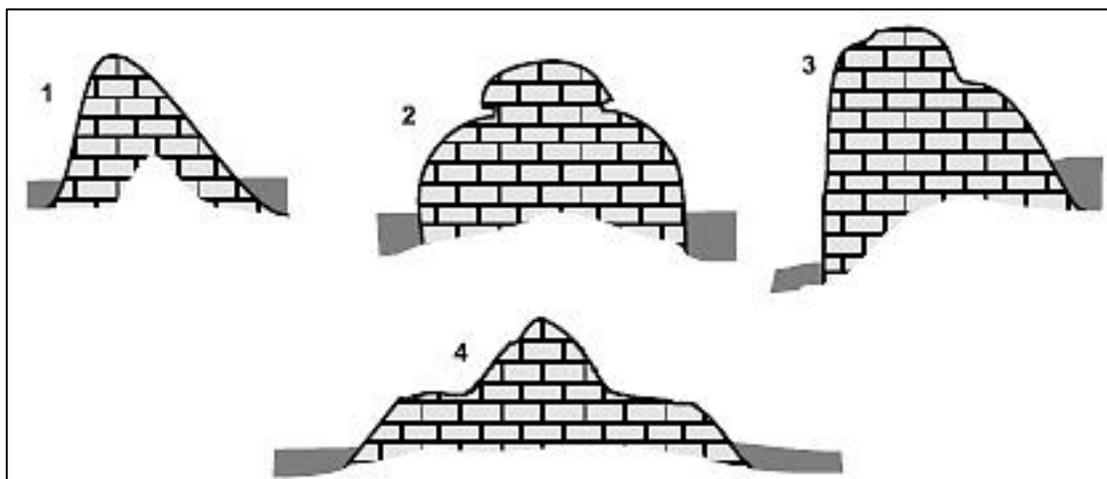


Figura 69. Ejemplos de variantes asimétricas de colinas kársticas residuales

Reproducido y adaptado de (Díaz del Olmo, y otros, 2003)

1. Cono asimétrico; 2. Mogote con mamelón y muesca de disolución; 3. Torre-Cono; 4. Cono con ruptura de pendiente en banqueta corrosiva.

⁹⁷ Aislados, sensu stricto por ruptura de pendiente, o también cuando se encuentran agrupados en un macizo kárstico y son considerados de manera independiente, como unidades geomorfológicas.

Estudios litológicos han mostrado una cierta relación entre el tipo de caliza y la forma y grado de inclinación de las laderas kársticas (Gutiérrez Elorza, 2008) (véase 3.2.1). Las cúpulas se asocian tanto con calizas como con dolomías (Gutiérrez Elorza, 2008), con *rudstones* y *framstones* (Figura 13) de gran dureza en las pendientes más pronunciadas (31°), y con calizas suaves (como *wackestones*⁹⁸), impuras y margosas en pendientes más suaves (15°) (Haryono, y otros, 2004). Los conos se relacionan con calizas muy diaclasadas (Sweeting, (1972) 2008), usualmente densas y duras, como *packstones*, *floatstones* y *rudstones* (Haryono, y otros, 2004) (Figura 13). Las torres se desarrollan, por lo general, en calizas cristalinas (Gutiérrez Elorza, 2008) (Figura 13). En cuanto a la precipitación, no existe una relación clara entre la magnitud de ésta y el tipo de colinas residuales desarrolladas (Gutiérrez Elorza, 2008).

En particular, las *cúpulas* tienen dimensiones típicas de decenas de metros (Espinosa Pereña, 1990), aunque en ocasiones pueden alcanzar hasta 150 metros de altura y 100 m de diámetro (Mateo Rodríguez, 1981). Estas morfologías fueron descritas por primera vez en Gunung Sewu, Indonesia, por Lehmann (1936) (Mateo Rodríguez, 1981) (Tabla 18).

La altura de los *conos* varía en diferentes lugares del mundo. Por ejemplo, en Jamaica éstos alcanzan dimensiones de 100 a 130 m de altitud y hasta 500 m de diámetro (Day, (2004) 2004). Con frecuencia, las laderas pueden estar cubiertas de una costra caliza muy resistente (Gutiérrez Elorza, 2008), sobre todo en aquellas orientadas a *barlovento*⁹⁹ (véase 3.2.1.11). Un ejemplo típico de estas geformas es el área de Shuicheng, China, conformada principalmente por conos kársticos que descansan sobre una superficie rocosa (Tabla 18) (Sweeting, 1995).

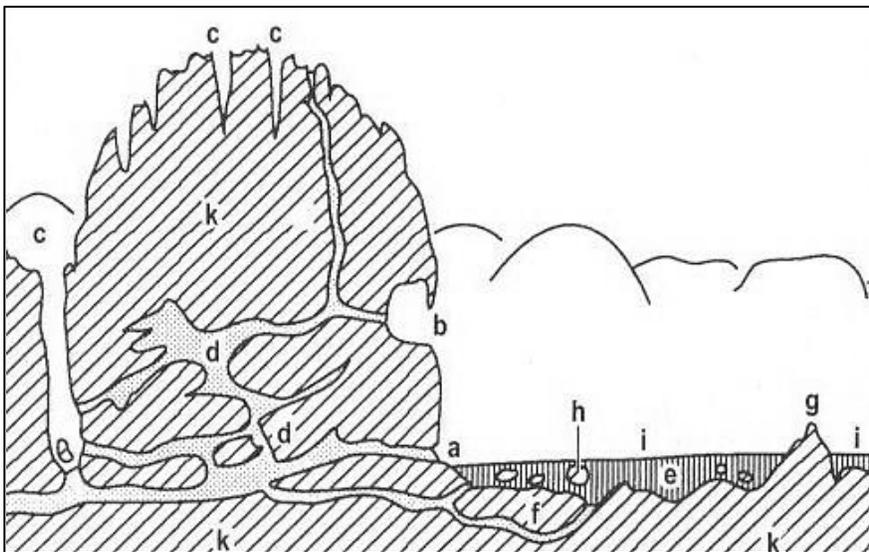


Figura 70. Características morfológicas de las torres del karst de la Sierra de los Órganos (Cuba)
 (Lehmann, (1955) 2008)

a: cueva activa al pie de la torre; b: cuevas abandonadas con espeleotemas; c: fracturas profundas karstificadas; d: cuevas vadasas relacionadas con antiguos niveles de llanura; e: fondo de valle aluviado; f: cuevas freáticas subfluviales; g: promontorios calizos; h: bloques sueltos de caliza; i: superficie de la llanura frecuentemente inundada; k: torre de caliza

Los *mogotes* son colinas kársticas de cima aplanada, redondeada¹⁰⁰ o serrada, pero que en su base presentan paredes verticales (Lehmann, (1954a) 1988) (Tjia, (1969) 1988) (Espinosa Pereña, 1990). Por característica, más anchos que altos, alcanzando diámetros de hasta 500 m (Gutiérrez Elorza, 2008). Se asocian con capas de débil inclinación y diaclasas en un sistema rectangular (Lugo Hubp, 1989). Por su morfología escarpada, los *mogotes* comparten varias características con las *torres*. Los *mogotes* se han descrito en la Sierra de los Órganos en Cuba, como región típica (Tabla 18).

Las *torres* son colinas escarpadas más altas que anchas, pudiendo superar los 300 m de altura (Gutiérrez Elorza, 2008) (Day, y otros, (2004) 2004). De paredes típicamente desnudas (Duckeck, 2011). Son remanentes de lechos calizos gruesos (De Blij, y otros, 2004). Por lo general, dichas morfologías son afectadas por la fracturación, desarrollando numerosos bogaz y corredores muy profundos (Figura 70).

⁹⁸ Calizas asociadas originalmente con el karst cónico residual (Haryono, y otros, 2004).

⁹⁹ Parte de donde viene el viento, con respecto a un punto o lugar determinado (Real Academia Española, 2011).

¹⁰⁰ Descritos en Java como *colinas sigmoideas* (Tjia, (1969) 1988).

Ejemplares típicos de torres se han descrito ampliamente en la región de Guangxi, China (**Tabla 18**).



Figura 71. Muecas en la base de una torre kárstica en Guilin, Guangxi (Ford, y otros, 2007)

A menudo, la superficie de las torres presenta costras calcáreas, de 1-2 m de potencia, de gran resistencia a la erosión. Este depósito actúa como capa protectora ante la corrosión kárstica, por lo que la evolución de la ladera es muy lenta y permite que las torres perduren (Gutiérrez Elorza, 2008). En aquellas torres donde se desarrollan a su pie lagos, *zonas cenagosas*¹⁰¹ y llanuras fluviales, es muy común encontrar gran actividad geomorfológica, sobre todo en su base. Se reconocen acanaladuras horizontales o *muecas* (**Figura 71**), próximas al pie del escarpe, de cientos de metros de longitud,

que indican antiguos niveles lacustres o fluviales. También es común la presencia de cavidades con surgencias de agua vadosa o freática, en la zona de *zapamiento*¹⁰² basal; ésto acelera la disolución de las calizas y como respuesta las laderas se hacen más escarpadas. Por el contrario, el cese del socavamiento basal, disminuye el ángulo de la ladera y la torre se degrada (Gutiérrez Elorza, 2008) (Gerstenhauer, 1960).

La existencia de cavidades (más o menos horizontales) en múltiples niveles de las torres, indica que éstas han ido creciendo a medida que la llanura se ha rebajado fundamentalmente por corrosión kárstica (Gutiérrez Elorza, 2008) (véase **3.2.1.2**). La **Figura 72** muestra un caso de estudio de la evolución de las torres kársticas.

Por otra parte, y en sentido geomorfológico-paisajístico, Carvajal (2004) afirma que en cada área incide un proceso y una geoforma característica, lo que en este caso correspondería a un tipo de colina kárstica residual. Sin embargo, la naturaleza del karst posibilita en varios casos, la coexistencia de distintas unidades geomorfológicas dentro del mismo marco paisajístico. Partiendo de ello es comprensible que las colinas kársticas residuales adquieran diferentes funciones en la composición del paisaje, i.e. asumiendo un *papel dominante*¹⁰³, *codominante*¹⁰⁴ o *subdominante*¹⁰⁵, en función del grado de desarrollo que presenten, abundancia, asociación y proporción respecto a los demás componentes del paisaje kárstico (e.g. karren, dolinas, uvalas, poljes, valles, etc.). En ese sentido se ha de entender el por qué las agrupaciones de colinas kársticas residuales se han clasificado típicamente como *karst de cúpulas*, *karst cónico* y *karst de torres*. A su vez, se ha de comprender por qué el *grado de aislamiento* o *agrupamiento* de las colinas kársticas residuales, también es considerado como criterio de clasificación, particularmente en la escuela karstológica china. Partiendo de esta lógica, y tomando en cuenta únicamente las formas positivas mayores, la dominancia en el paisaje de los diferentes tipos de colinas kársticas

¹⁰¹ Lleno de cieno (lodo) (Real Academia Española, 2011).

¹⁰² Excavación de galería subterránea o de zanja al descubierto (Real Academia Española, 2011).

¹⁰³ Que sobresale, prevalece o es superior entre otras cosas de su orden y clase (Real Academia Española, 2011).

¹⁰⁴ Que su expresión en el paisaje es equivalente con otra unidad geomorfológica.

¹⁰⁵ Que su expresión en el paisaje es inferior respecto a la unidad geomorfológica dominante.

residuales (**Tabla 16**), resultaría en cuatro paisajes principales: *karst de cúpulas*, *karst cónico*, *karst de mogotes* y *karst de torres*. La **Tabla 17** muestra las equivalencias de clasificación de colinas kársticas residuales entre diferentes autores.

Tabla 17. Paisajes de colinas kársticas residuales (enfoque morfológico)

| | | | | |
|-----------------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|------------------------|
| (Peña Ramírez, 2012) | <i>Karst de cúpulas</i> | <i>Karst cónico</i> | <i>Karst de mogotes</i> | <i>Karst de torres</i> |
| (Ford, y otros, 2007) | <i>Tower karst</i> | | | |
| (Day, y otros, (2004) 2004) | <i>Tower karst</i> | <i>Cone karst</i> | <i>Tower karst</i> | |
| (Gutiérrez Elorza, 2008) | <i>Karst cónico</i> | | <i>Karst de torres</i> | |
| (Mateo Rodríguez, 1981) | <i>Carso cúpulas</i> | <i>Carso cónico</i> | <i>Carso de torres</i> | |
| (Lehmann, (1936) 1988) | <i>Kegelkarst</i> | | <i>Turmkarst</i> | |

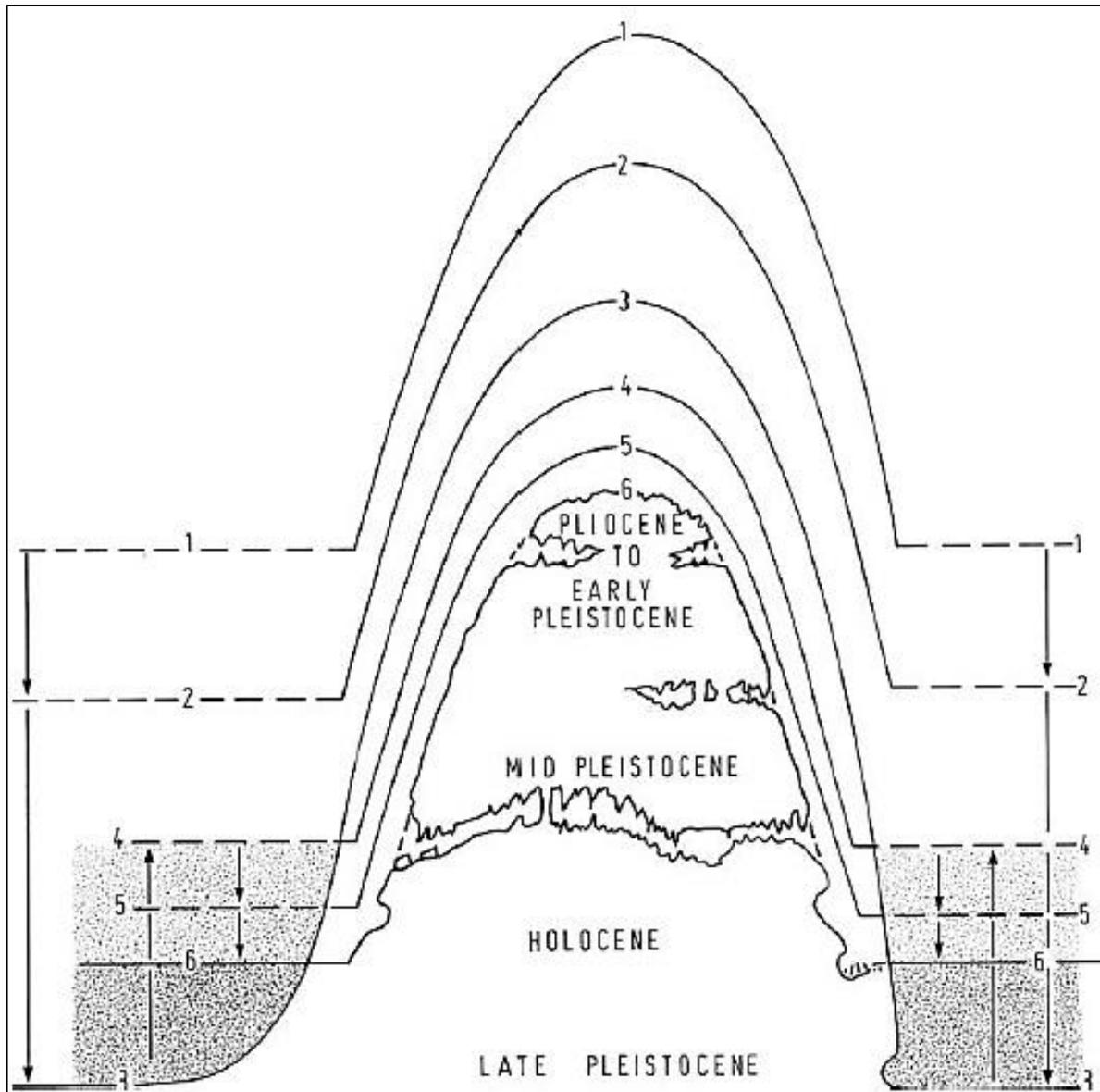
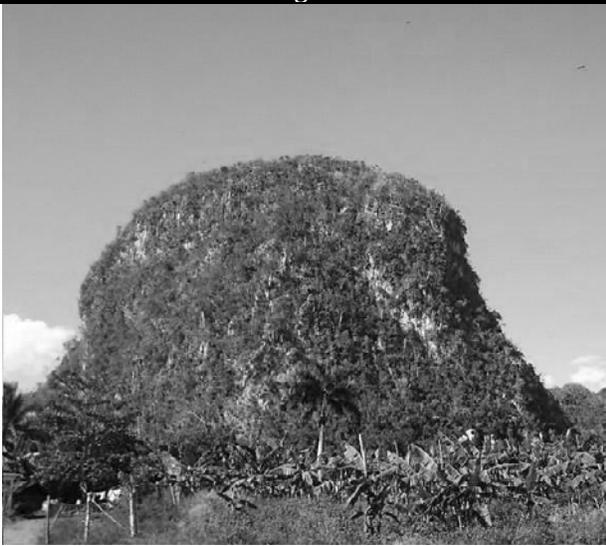


Figura 72. Modelo evolutivo de una torre kárstica cerca de Guilin, ilustrando los episodios de enterramiento y exhumación, simultáneos a la reducción de la torre por disolución

(Williams, (1987) 2007)

Las cuevas abandonadas son indicadores de fases antiguas en el desarrollo de la torre, mientras que las muescas y las cuevas basales marcan el nivel actual y anterior de la planicie de inundación.

Tabla 18. Ejemplares Tipo. Colinas kársticas residuales de las zonas tropicales

| <i>Cúpula</i> | <i>Cono</i> |
|---|---|
|  |  |
| <p>Cúpula en el karst de Gunung Sewu, Kemadang, Indonesia Reproducido de (ikankecil3, 2011)</p> | <p>Cono en la meseta kárstica de Guizhou, China (Sweeting, 1995)</p> |
| <i>Mogote</i> | <i>Torre</i> |
|  |  |
| <p>Mogote en la Sierra de los Órganos, Pinar del Río, Cuba Reproducido de (BedinCuba, 2011)</p> | <p>Torre junto al Río Jingbao, Guangxi, China (Waltham, (2004) 2004)</p> |

El *karst de cúpulas* está caracterizado por la unión estrecha de elevaciones semiesféricas o cupulares de trazado circular, divididas por monturas cóncavas (Mateo Rodríguez, 1981). Se describió por primera vez, en la montaña Sewu de Indonesia, por Lehmann (1936), en Tabasco, México; Sulawesi, Jamaica y Puerto Rico (Mateo Rodríguez, 1981).

El *karst cónico* se caracteriza por numerosas colinas cónicas o hemisféricas, separadas por depresiones cerradas (Sweeting, (1958) 2008) como en el *cockpit karst* (Figura 49); visualmente aisladas entre ellas, sobresaliendo en una planicie de corrosión (Figura 73); o compartiendo superficies inferiores como pedestales o remanentes de crestas (Day, (2004) 2004) (Figura 74). Este paisaje kárstico es conocido en China, Java, Malaysia, Papúa Nueva Guinea, Myanmar, Vietnam, Tailandia, Camboya, Laos, Filipinas, México, Belice, Guatemala, Cuba, Jamaica, Puerto Rico, República Dominicana y Haití (Day, (2004) 2004). Lehmann (1936) provee un modelo evolutivo de este paisaje kárstico (Figura 74). Comienza por una superficie aplanada que se abomba por actividad endógena. Esta variación del relieve produce un rejuvenecimiento del drenaje, que se manifiesta por una fuerte incisión de los barrancos en las calizas. La etapa posterior consiste en un desmembramiento con desarrollo de depresiones cerradas y generación de los conos, debido a que la disolución química es mayor que la erosión fluvial (Gutiérrez Elorza, 2008).



Figura 73. Karst cónico (Sweeting, 1958) en el Monumento Natural Chocolate Hills, Bohol, Filipinas

Reproducido de (Spot Cool Stuff, 2011)
Nótese la doble presencia de *cúpulas* y *conos*

Ambos, el *karst de cúpulas* y el *karst cónico* se asocian comúnmente con el *karst poligonal* (Sweeting, (1958) 2008) (Haryono, y otros, 2004).

El *karst de torre* está constituido por colinas escarpadas (Gutiérrez Elorza, 2008), unas veces aisladas y otras agrupadas, dispuestas sobre planicies o pedestales (Ford, y otros, 2007). Se encuentran principalmente en los límites de los macizos kársticos adyacentes a la llanura kárstica y a los poljes (Mateo Rodríguez, 1981). Regionalmente, es a menudo atravesado por ríos alógenos, aunque también por ríos autóctonos, vía fuentes kársticas en la base de las torres (Day,

y otros, (2004) 2004). Las torres suelen estar rodeadas por estos ríos, lagos o una llanura aluvial (Gutiérrez Elorza, 2008). Este paisaje se desarrolla en el área del Caribe, Indonesia, Nueva Guinea y, sobre todo, en el sureste asiático, donde al sur de China y norte de Vietnam alcanza una extensión de 600,000 Km² (Sweeting, (1972) 2008).

La escuela karstológica china basa su clasificación en el criterio de asociación de las colinas kársticas residuales, distinguiendo dos variedades principales (Yuan, 1986): *fenglin* (bosque de picos), que corresponde a torres aisladas en una planicie (*karst de planicie-fenglin*) (**Figura 75**); y *fengcong* (agrupación de picos), conjunto de colinas residuales agrupadas, que emergen de un basamento rocoso común, situado por encima de la planicie kárstica (**Figura 76**). El *fengcong* puede desarrollarse como un *cockpit karst* acentuado, las torres como residuos alrededor de dolinas grandes y profundas (*karst de depresión-fengcong*); o en otro caso, las torres pueden estar separadas por una red de valles secos (*karst de valle-fengcong* o *fluviokarst de valles secos*) (**Figura 62**), en donde el fondo de los valles está a menudo incidido por depresiones cerradas, separadas por collados (Sweeting, 1995) (Ford, y otros, 2007). Esta clasificación no distingue los tipos de colinas kársticas presentes en el paisaje.

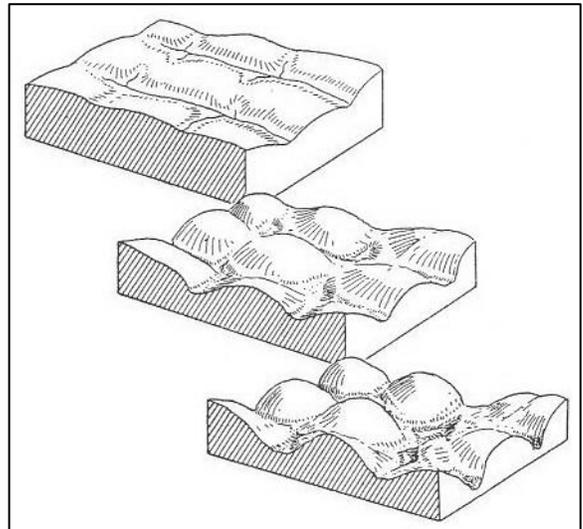


Figura 74. Evolución del karst cónico (Sweeting, 1958) en Gunung Sewu, Java, Indonesia (Lehmann, (1936) 1988)

Otras clasificaciones del karst sopesan el factor morfo-genético como criterio taxonómico principal. En la propuesta de Zhang Zhigan (1980a) (**Figura 77**) las diferentes expresiones del paisaje kárstico son agrupadas, en primera instancia, conforme al ambiente geológico-geográfico, i.e. los factores tectónico y climático; en segunda instancia, el tiempo implicado para el modelado kárstico; y en tercera instancia el factor morfológico (Sweeting, 1995). La clasificación correspondiente de la escuela cubana, propuesta por Núñez (1984) (**Figura 78**), agrupa los diferentes tipos de karst conforme a tres unidades taxonómicas. La primera basada en las grandes divisiones morfogenéticas del relieve, e.g. llanuras y alturas; la segunda conforme a la litología en que se desarrolla el karst; y la tercera de acuerdo a la morfología del karst predominante.

Si bien los sistemas de clasificación hasta ahora expuestos no abarcan todas las propuestas existentes, son los más ampliamente aceptados por la comunidad karstológica internacional. Aunque debe subrayarse que no existe un sistema de clasificación generalmente aceptado, por lo que además de constituir un importante problema geográfico, es a su vez un problema aún no resuelto (Mateo Rodríguez, 1981). Con el fin de justificar el marco teórico descrito en este apartado, y por ende, la propuesta de clasificación seleccionada para la evaluación del exokarst tropical del PEST, se expone la siguiente discusión.

Como corolario se ha de comprender la diferencia entre una taxonomía tipológica y una regional. La primera consiste en la determinación de los diferentes tipos de karst, según el principio de semejanza, tomando ciertos y determinados criterios para establecer las diversas unidades taxonómicas (clases, tipos, subtipos, etc.). La segunda, fundada en la regionalización de los fenómenos kársticos, sobre la base de determinar las diversas unidades, siguiendo los principios de irrepetibilidad y de características propias (Núñez Jiménez, y otros, 1984).



Figura 75. Fenglin junto al río Lijiang, Guangxi
Fotografía de A. Waltham, reproducida de (Ford, y otros, 2007)



Figura 76. Fengcong a lo largo del horizonte de transición a karst de torre en un valle en la región de Guilin, Guangxi
(Ford, y otros, 2007)

Independientemente del tipo de taxonomía, Stupshin (1967) afirma que la tipología kárstica debe contener en sí la esencia fundamental del karst, y reflejar los rasgos de su diversidad morfológica; por su parte Panos (1964) apunta que la tipificación moderna se debe fundamentar en la génesis real, la dinámica y la historia del desarrollo del relieve (Núñez Jiménez, y otros, 1984). Ahora bien, para estimar la consideración correcta de estos postulados en las clasificaciones mencionadas, es importante denotar las semejanzas, diferencias y sentido en cómo éstas abordan los factores genético, evolutivo y morfológico.

En principio, es evidente que la mayoría de las clasificaciones del karst tropical consideran como criterio último de tipificación al factor morfológico, a escala de unidad geomorfológica (Carvajal, y otros, 2004). Esto es razonable por el principio de que la expresión morfológica del paisaje kárstico (en primer orden) y de las unidades geomorfológicas asociadas (en segundo orden), son la respuesta al complejo de procesos que les han dado origen.

| Karst-moulding geological-geographical environment | | | Time for moulding karst | Karst type | | | |
|--|-------------------------------|--|-------------------------|---|--|---|-------------------------------------|
| Tectonic unit | Climatic zone | | | Name | Representative area | | |
| Uplift zone | Intense uplift | Massive uplift | Modern karst | Plateau relict peak-forest type (Qinghai-Xizang type) | Qinghai-Xizang plateau | | |
| | | Linear uplift | | High mountain-canyon type (Tianshan type) | Tianshan mountains and jingping mountains, western Sichuan | | |
| | Moderate uplift | Massive uplift | | Plateau-canyon type (Guizhou type) | Yunnan-Guizhou plateau and mountainous areas of western Hunan and western Hubei | | |
| | | | | Humid subtropical and temperate zones | | Loess mountainous area-wide valley type (Shanxi type) | Loess plateau |
| | Gentle uplift | Linear uplift | | Semiarid temperate zone | | Medium mountain-canyon type (Dabashan type) | Daba, Longmen and Qinling mountains |
| | | | | Humid temperate zone | | Peak forest type (Guangxi type) | Guangxi basin |
| | | Humid tropical and subtropical zones Semihumid temperate zone | | Hill-wide valley type (Central Shandong type) | Low mountains and hills in central and southern Shandong, Liaoning peninsula and piedmont hills of the Yanshan and Taihang mountains | | |
| Subsidence zone | Differential block uplift | Humid temperate and subtropical zone | | Block-lake basin type (Eastern Yunnan type) | Lake-basin area, eastern Yunnan | | |
| | Differential block subsidence | Controlled by the paleoclimatic zone | | Buried block mountain type (Pohai Gulf type) | Huang-Huai-Hai plain, lower Liache plain, Pohai Sea and Tiang-Han plain | | |
| | Depression | do | | Depressed basin type (Sichuan type) | Ordos, Xinchui basin and Sichuan basin | | |

Figura 77. Clasificación de tipos morfo-genéticos de karst en China (Zhang Zhigan, 1980a)
Reproducido de (Sweeting, 1995)

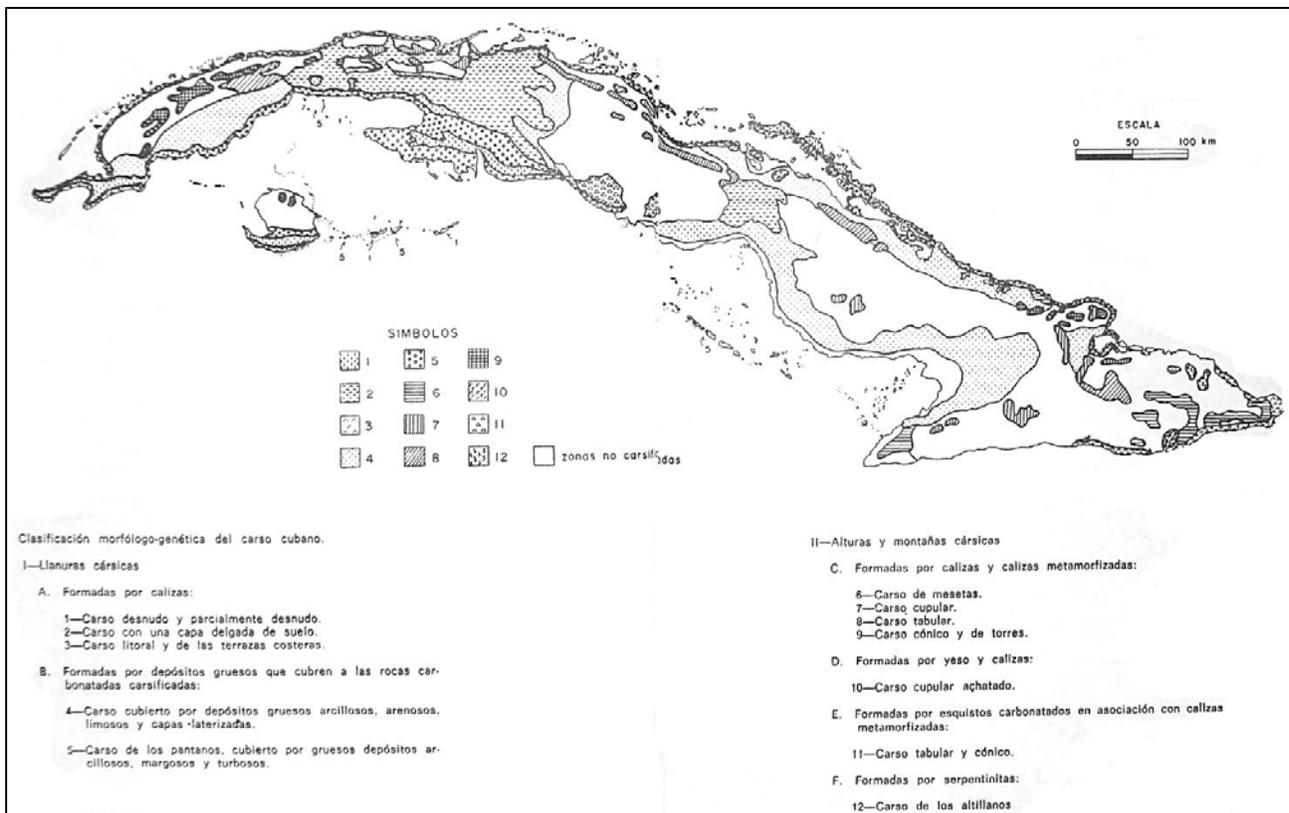


Figura 78. Clasificación morfo-genética del karst cubano
(Núñez Jiménez, y otros, 1984)

Respecto al factor genético, las propuestas se encuentran divididas. Así, mientras la escuela karstológica tradicional (representada por D. Ford, P. Williams y W. White, entre otros) basa su clasificación en el principio de dominancia de cierto proceso geomorfológico sobre el paisaje kárstico; las escuelas china y cubana coinciden en asociar cada tipo de paisaje kárstico con un conjunto dado de condiciones geológico-geográficas, tectónica-clima y fisiografía-litología, respectivamente.

En cuanto al factor evolutivo existe una aceptación generalizada, en el sentido de entender a la evolución kárstica como una secuencia de etapas morfológicamente distintivas. Lo que en términos tradicionales se ejemplificaría por la secuencia de desarrollo del karst laberíntico (**Figura 38**) y del karst cónico (**Figura 74**).

Llevando más a fondo esta discusión, es notable que tanto Zhang Zhigan (1980^a) como Núñez (1984), heredan un marcado determinismo geológico-geográfico a su clasificación. Determinismo que resulta ser un tanto ambiguo, asumiendo que la expresión actual del paisaje kárstico es resultado de un conjunto multivariado de procesos geológicos actuando a través de millones de años, con frecuencia dando lugar a karstificaciones polifásicas (Sweeting, 1995).

Por ejemplo, en la propuesta de clasificación morfo-genética de los tipos kársticos de China, Zhang Zhigan (1980a) relaciona en proporción directa la intensidad del levantamiento tectónico con el tipo de paisaje kárstico resultante. Esta afirmación generalizada puede dar lugar a errores de interpretación, por ejemplo, cuando se asocia el karst tipo fenglin exclusivamente con un levantamiento tectónico leve (**Figura 77**), sin tomar en cuenta casos donde en una misma unidad tectónica se presentan karst tipo fenglin y fengcong, producto de tasas evolutivas diferenciales, como es el caso de la región de Guangxi. Otro error de interpretación, producto de esta generalización, es el que resulta del hecho de asignar una zona climática a cada paisaje kárstico. Si bien se ha referido que la zonación climática es un criterio válido para la clasificación del karst en general (véase **3.2.1.11**), este razonamiento ve reducida su validez a escala regional y local. Esto, a razón de que a escalas mayores, la actuación del clima sobre el karst se ve fragmentada en sus elementos (e.g. temperatura, precipitación y humedad, dirección y fuerza del viento, etc.), los cuales participan en el modelado de manera diferencial en espacio-tiempo, a lo que se suma una interacción más acentuada con los demás factores geomorfológicos. De igual manera, el caso de Guangxi provee un ejemplo de dos tipos de paisaje kárstico diferentes (fenglin y fengcong), presentes en una misma zona climática (**Figura 77**).

Núñez (1984) cataloga su propuesta como una clasificación tipológica de enfoque geográfico o morfo-genético, basado en el consenso de que este tipo de clasificación es la más general y universal, por cuanto constituye la expresión sintética¹⁰⁶ de todas las manifestaciones, factores y condiciones que determinan el desarrollo kárstico. Afirmando también que la forma del karst es la respuesta a la incidencia de todas las condiciones que influyen en el mismo. Así, partiendo de ello, dicha catalogación es incongruente por varias razones. En primer lugar, y en sentido estricto, la expresión morfológica actual del paisaje kárstico, sumada a la litología (**Figura 78**), no abarcan por mucho, todas las condiciones que influyen en el desarrollo kárstico, tales como las condiciones climáticas, estructurales y evolutivas, por mencionar sólo algunas. En segunda instancia, al considerarse una clasificación tipológica, implicaría que ésta posee una aplicación universal en el karst, o al menos en el karst tropical; de manera que los paisajes kársticos encontrados podrían compararse con otras regiones de la zona intertropical, y así, encontrar coincidencias por similitud morfológica, genética y evolutiva. En esta taxonomía, dicha implicación es parcialmente improbable por las siguientes razones:

- a) El hecho de que el criterio de clasificación de la unidad taxonómica basal (clase) (la que fungiría como paisaje kárstico en asociación con las demás) sea demasiado general, y que

¹⁰⁶ Perteneciente o relativo a la síntesis, que es la suma y compendio de una materia u otra cosa (Real Academia Española, 2011).

las descripciones correspondientes a la unidad taxonómica basal (clase) y final (tipo), posean un marcado regionalismo, da pie a ciertos errores de interpretación, como por ejemplo, el asumir que los campos de lapiaz son exclusivos de áreas bajas (alturas absolutas de 0-10 metros) (Núñez Jiménez, y otros, 1984), o que el karst de cúpulas, cónico y torres es típico de alturas y montañas (agrupación que el mismo autor encuentra compleja al describir casos en donde estas colinas se encuentran en superficies bajas).

- b) La agrupación de los tipos kársticos (unidad taxonómica final) por medio de la morfología del karst predominante (Núñez Jiménez, y otros, 1984), es por consenso geomorfológico, tan adecuada, como la asociación de la litología (género) con las unidades taxonómicas. Sin embargo, el agrupamiento basal de estas unidades taxonómicas en función de las grandes divisiones morfogenéticas (clase), y sin establecer la más mínima relación evolutiva o temporal, es un error, si es que se pretende establecer una clasificación tipológica de carácter universal. Se entiende que la expresión actual de cada paisaje kárstico es producto del actuar de un conjunto de condiciones geológico-geográficas sincrónicas a éste, o si se quiere ver de otra manera, de un proceso geomorfológico dominante (Carvajal, y otros, 2004); paisaje que a su vez es resultado de una historia específica de procesos geomorfológicos dominantes, actuando a través del tiempo geológico, cuya expresión topográfica delimita las diferentes etapas evolutivas del desarrollo kárstico, en función de la posición del nivel base de disolución. Según la propuesta de Núñez (1984), los pavimentos calizos y las planicies de corrosión son agrupados en la misma clase (llanuras kársticas), tomando como criterio de agrupamiento lo llano de la superficie. El error radica en que dicho criterio de agrupamiento, al ser considerado de manera aislada (i.e. sin tomar en cuenta que es resultado directo de la etapa evolutiva en que se encuentra el karst) devuelve agrupaciones evolutivamente incongruentes. Así, volviendo al ejemplo, el pavimento calizo, exclusivo de una etapa evolutiva incipiente, sería hermano de la planicie de corrosión kárstica, propia de una etapa evolutiva final. Por ende, es evidente que una clasificación tipológica basada únicamente en factores genéticos y morfológicos adolece de validez, en un contexto donde el objeto de estudio (e.g. el karst) es modificado a través del tiempo y del espacio.
- c) Por demás, es importante señalar que la inclusión, en esta clasificación, de modelados, producto de procesos endokársticos (karst cubierto), es enriquecedora. Se sabe que dichos modelados son resultado del actuar de los procesos erosivos y deposicionales, controlados por las distintas etapas evolutivas del desarrollo kárstico. Por tanto, sería más adecuado que dicha inclusión se estableciera bajo un contexto integral (genético, evolutivo y morfológico).

La taxonomía de la escuela karstológica china, sustentada por Yuan (1986), es referida por Sweeting (1995) como una clasificación morfológica-descriptiva. A pesar de ello, y aunque no lo parezca, el criterio de asociación es eminentemente evolutivo, más que genético, como ha sugerido Waltham (2008). El grado de asociación de las colinas kársticas puede ser considerado un símil del grado de desmembramiento o denudación de los macizos kársticos. Grado, que en términos geomorfológicos chinos, fluctuaría en parte del fengcong al fenglin, i.e. de la madurez a la senectud.

Bajo el mismo tenor de debate, la escuela karstológica tradicional fundamenta su clasificación en el principio de agrupamiento por dominancia común actual de procesos y unidades geomorfológicas, enfoque que corresponde a una taxonomía artificial universal. Así por ejemplo, el karst laberíntico cónico (**Figura 20**) queda definido por la dominancia en el paisaje de la erosión lineal (proceso geomorfológico) y de colinas kársticas residuales cónicas (unidad geomorfológica), entre muchos otros procesos y expresiones morfológicas subdominantes, especificadas en su descripción. Es precisamente bajo este enfoque como se ha planteado el marco teórico de la presente investigación. Aunque la base teórica está totalmente fundamentada en la escuela tradicional, ésta ha sido en ocasiones modificada con el único fin de ampliar y

precisar la caracterización de los diferentes tipos de paisajes kársticos¹⁰⁷. La descripción de los paisajes kársticos, provista por la teoría tradicional, es complementada con los cuatro puntos de relación proceso-roca-morfología, sugeridos por Ford y Williams (2007) (véase **3.2.1.10**). Todo ello con el propósito de estandarizar los caracteres que definen el proceso y la unidad geomorfológica dominante en cada paisaje kárstico. Además, atendiendo a la visión integral del karst (génesis, evolución y morfología), cada paisaje kárstico es asociado (como es sugerido por Ford y Williams (2007)) con la posición y dinámica del nivel base correspondiente.

Para dar fin a la discusión taxonómica, es de suma importancia aunar al marco teórico tres de los postulados expuestos por la escuela karstológica indonesio-norteamericana, representada por Day M. (1981) y Haryono E. (2004). Tal como se ha expuesto, actualmente no existe un consenso internacional de clasificación para los paisajes con dominancia de colinas kársticas residuales, tanto en origen como en morfología (Nguyet, 2006) (**Tabla 17**), e.g. karst de cúpulas, karst cónico, karst de torre. Sin embargo, y siguiendo rigurosamente la misma lógica de clasificación de la escuela tradicional, y en correspondencia con lo planteado por Carvajal y otros (2004), la dominancia en el paisaje de colinas kársticas residuales, o de sus tipos, no debería ser tomada como criterio de clasificación primario, puesto que se trata de una unidad geomorfológica específica y de sus tipos particulares, mas no de un proceso geomorfológico. Por ejemplo, mientras Ford y Williams (2007) denominan karst de torre a los paisajes dominados por colinas kársticas residuales (aisladas o asociadas sobre pedestales) dispersas a través de una planicie, otros autores relacionan la dominancia en el paisaje de cada tipo de colina residual con un tipo respectivo de karst, i.e. karst de cúpulas, karst cónico y karst de torre. Como alternativa de solución a esta controversia, Day y Haryono (1981, 2004) introducen dos postulados. Por un lado el término *karst residual*, el cual describe paisajes caracterizados por colinas kársticas residuales dispersas en una planicie de corrosión, donde el proceso geomorfológico dominante es el aplanamiento por corrosión, acompañado por eliminación de colinas residuales¹⁰⁸; y por otro, la idea (en teoría y práctica) de incorporar las formas cónicas dentro de una clasificación universal de los tipos de paisaje kárstico tropical (clasificación correspondiente con la taxonomía de la escuela tradicional). Estos postulados son por mucho novedosos en varios aspectos. La dominancia (sensu stricto) en el paisaje de colinas kársticas residuales es asignada exclusivamente a un tipo de paisaje kárstico (karst residual o fenglin) con dominancia de un proceso geomorfológico específico (**Tabla 19**). Por ende y para evitar imprecisiones, los paisajes caracterizados por colinas kársticas residuales asociadas, son ahora reclasificados como karst poligonal o fengcong (Peña Ramírez, 2012). Contrario a lo sugerido por Waltham (2008)¹⁰⁹, la incorporación del tipo de unidad geomorfológica dominante (de formas positivas mayores, e.g. cono) a la terminología taxonómica tradicional, enriquece ampliamente la caracterización de los diferentes tipos de paisaje kárstico.

Tabla 19. Paisaje de colinas kársticas residuales (enfoque integral)

| | |
|---------------------------------|---|
| <i>Karst residual o fenglin</i> | Topografía caracterizada por colinas kársticas residuales dispersas en una planicie de corrosión, donde el proceso geomorfológico dominante es el aplanamiento por corrosión, acompañado por eliminación de colinas residuales. |
|---------------------------------|---|

Bajo un enfoque genético, la literatura internacional sugiere cuatro tipos principales de karst residual (Ford, y otros, 2007) (**Figura 79**):

1. Colinas residuales sobresaliendo de una superficie calcárea aplanada, chapeada por aluvión.
2. Colinas residuales emergiendo de lechos carbonatados en una superficie aplanada desarrollada principalmente a través de rocas no cálcicas.

¹⁰⁷ Toda modificación a la teoría tradicional ha sido fundamentada con base en fuentes especializadas y análisis rigurosos.
¹⁰⁸ Término que corresponde íntegramente con el karst tipo fenglin de Yuan (1986), y parcialmente con el karst de torre de Ford y Williams (2007).
¹⁰⁹ Conos y torres son términos puramente descriptivos con una significancia genética mínima (Waltham, 2008).

3. Colinas carbonatadas sobresaliendo a través de una superficie agradada por sedimentos clásticos que entierran la topografía kárstica subyacente.
4. Torres carbonatadas aisladas elevándose desde pedestales escarpados de varias litologías.

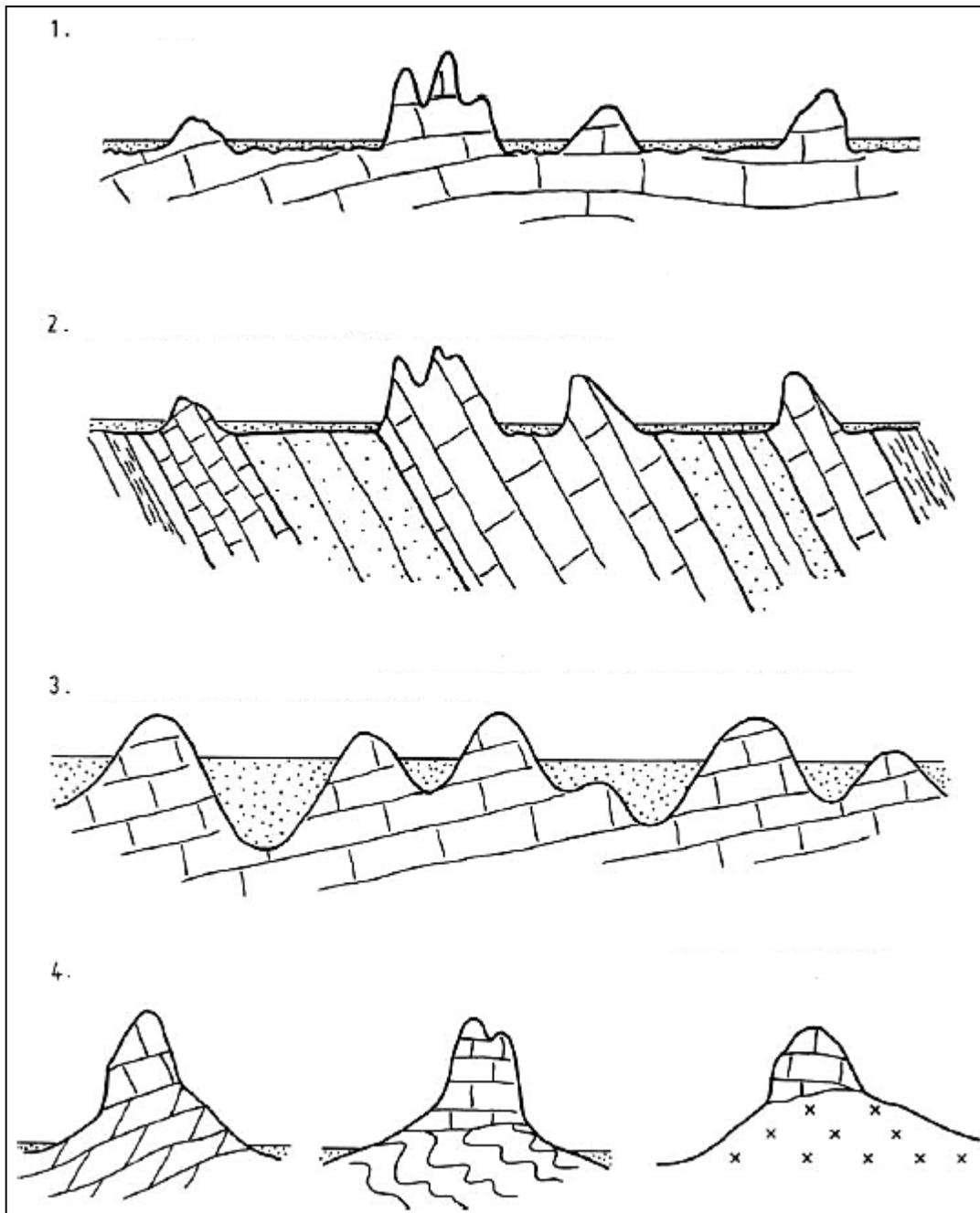


Figura 79. Tipos de karst residual
Reproducido y adaptado de (Williams, (1987) 2007)

Ejemplos del segundo tipo son los karsts de Sierra de los Órganos en Cuba (Panos, y otros, (1968) 2007) y Chillagoe, Queensland, Australia (Jennings, (1982) 2007); del tercero la zona costera de la bahía de Ha Long, Vietnam (Pham, (1985) 2007) y las planicies arenosas entre los mogotes de Puerto Rico (Monroe, (1968) 2007). Dichas planicies se encuentran frecuentemente aterrazadas. Las terrazas se desarrollan a menudo sobre depósitos superficiales y también sobre el lecho rocoso.

Complementariamente, y retomando la reflexión acerca de la dominancia, codominancia e insipiente de las colinas kársticas residuales en el paisaje, Day (1981) propone de manera semejante tres tipos de paisajes kársticos: 1) Aquellos donde las depresiones cerradas son dominantes y se intercalan colinas incipientes, 2) Paisajes en donde las depresiones cerradas y las colinas residuales alcanzan aproximadamente la misma prominencia, 3) Paisajes donde las colinas residuales son dominantes e intervienen con superficies casi planas (Gunn, 2004). Ambos razonamientos coinciden con la polifacética expresión de las colinas residuales en el paisaje, confirmando la importancia de su especificación en la terminología taxonómica del karst.

3.3.1.7 SECUENCIAS EVOLUTIVAS DEL KARST EN TERRENOS HÚMEDOS

A comienzos del siglo XX la geomorfología evolutiva se encontraba bajo la influencia generalizada del paradigma Davisiano (Ford, y otros, 2007). El ciclo de erosión, propuesto por W.M. Davis, marcaba los lineamientos evolutivos de los paisajes "normales". No fue hasta 1893, cuando Jovan Cvijic, padre de la geomorfología kárstica moderna, sentó las bases para el desarrollo de la karstología evolutiva. Bajo la influencia de Albrecht Penck y W.M. Davis, Cvijic sugirió en 1893 una secuencia evolutiva del karst, incorporando la relación existente entre dolinas, uvalas y poljes (**Figura 80**) (Ford, y otros, 2007). Hacia 1918, el mismo autor publicó su propuesta definitiva de la evolución morfológica del karst y su relación con la hidrología subterránea, basado en el karst dinárico. Este paradigma se preservó intacto hasta la aparición de ideas críticas acerca de la influencia de la evolución climática y topográfica. Ejemplos notables de ello son el trabajo de H. Lehmann (1936), acerca de la evolución kárstica y su diferenciación según zona climática; y el modelo de Zhu (1988) (**Figura 81**) referente a la evolución paralela del fengcong y fenglin de las regiones subtropicales húmedas en la región de Guilin, China (Ford, y otros, 2007).

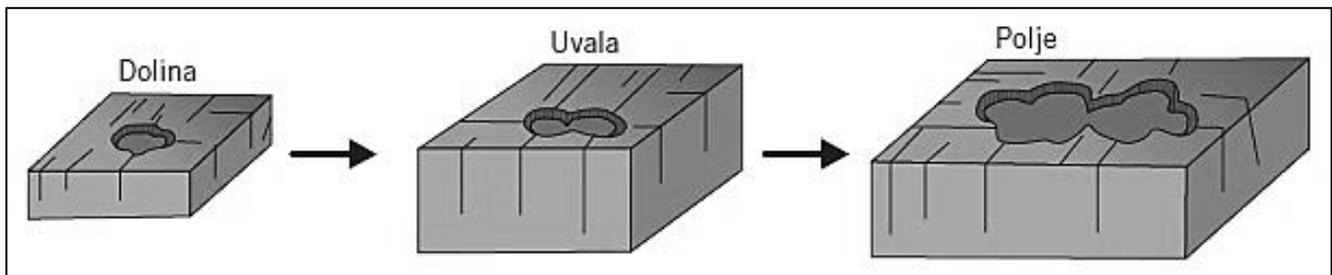


Figura 80. Evolución de dolina a polje
 (Junta de Andalucía, 2006)

Ford y Williams (2007) sugieren que la fase inicial del desarrollo kárstico, i.e. de la erosión kárstica, puede ser concebida mediante tres principales puntos de inicio:

1. Roca levantada, densa y no karstificada, protegida por una cubierta de estratos impermeables.
2. Roca levantada y no karstificada, con alta porosidad primaria y sin ningún tipo de cobertura.
3. Roca levantada y karstificada en una fase de erosión previa.

Dos variantes importantes del primer caso son (Ford, y otros, 2007) (**Figura 82**):

- 1a. En presencia de estratificación horizontal o inmersiones río arriba, donde las cubiertas de estratos impermeables se sitúan por debajo y detrás del límite de salida del río.
- 1b. Donde el estrato calizo es fisurado río abajo y la capa impermeable es socavada abajo y hacia los límites del río.

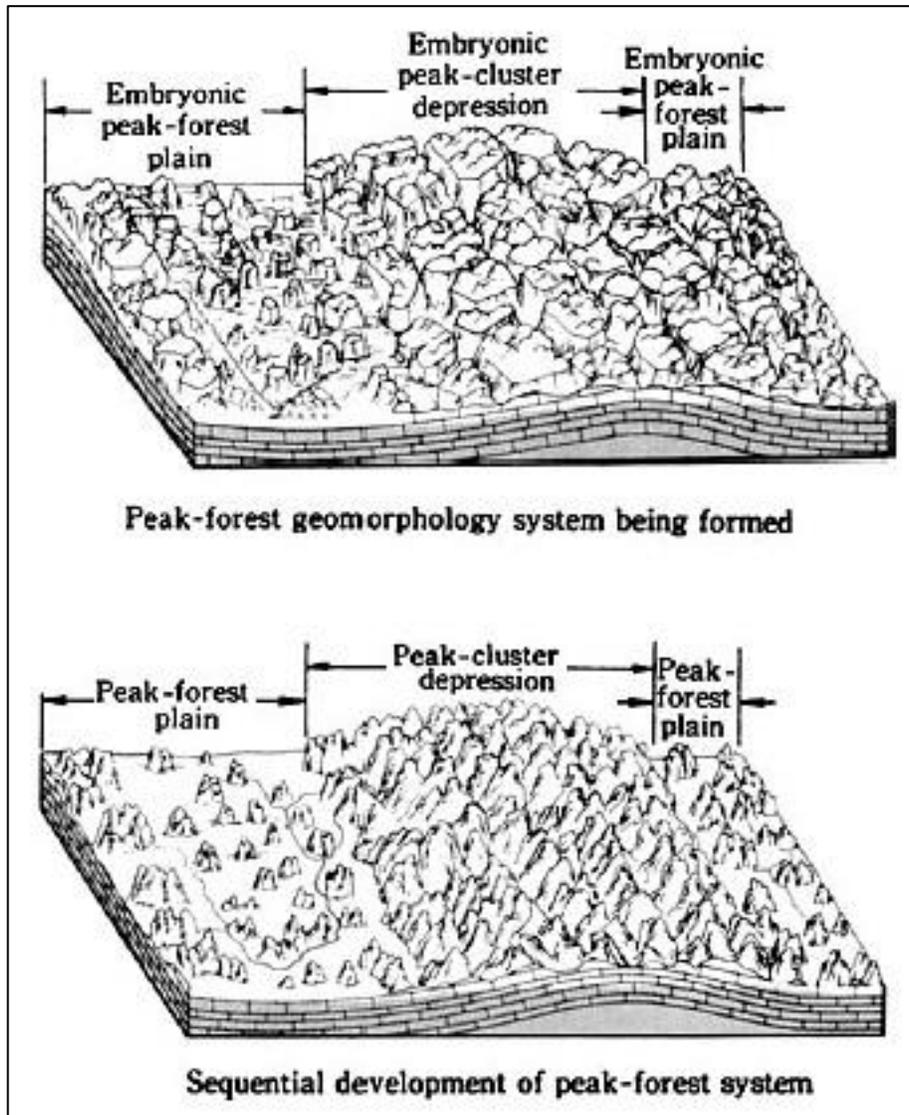


Figura 81. Desarrollo del fengcong y fenglin de las regiones subtropicales húmedas en la región de Guilin, China

(Zhu, (1988) 2007)

Nótese el desarrollo secuencial y evolución paralela del fengcong y fenglin en áreas vecinas. El fengcong se desarrolla donde el nivel freático descansa a profundidad por debajo de la superficie; mientras que el fenglin se presenta donde el nivel freático es poco profundo y los ríos se disponen en superficie.

Ahora bien, concerniente a la evolución específica del exokarst tropical, existen varias discrepancias. Las propuestas y discusiones de Zhu (1988), Ford y Williams (2007) y Waltham (2008) proveen ejemplos destacados.

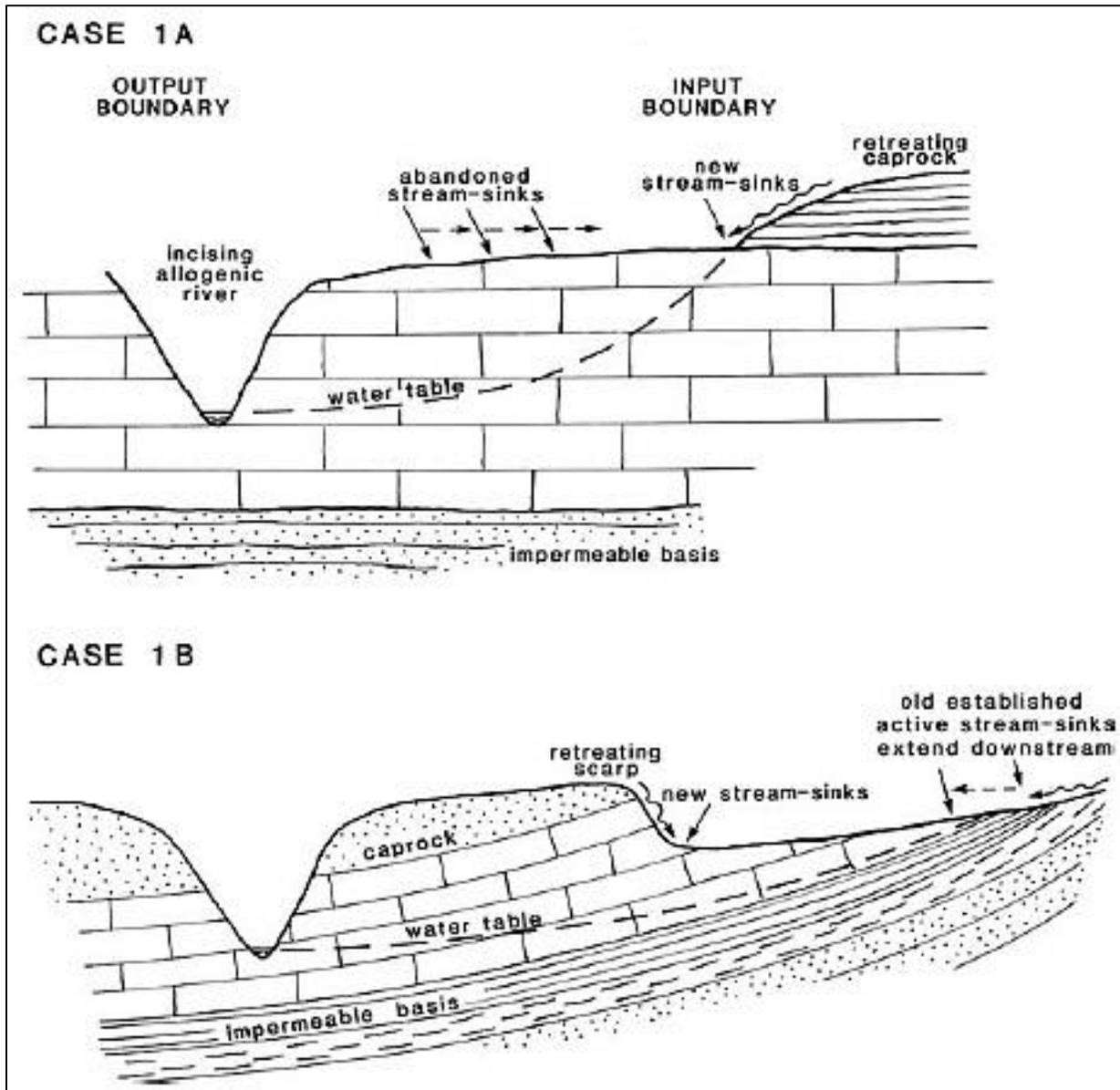


Figura 82. Evolución kárstica en roca carbonatada, densa y levantada, protegida por una cubierta de estratos (Ford, y otros, 2007)

Caso 1a estratos horizontales; Caso 1b estratificación inclinada río abajo.

Ford y Williams (2007), consideran dos hipótesis acerca del origen del karst residual:

1. El karst residual (o fenglin) se genera de forma secuencial a partir de un karst poligonal previo.
2. El karst residual se genera de manera directa.

Ambas alternativas fueron examinadas por Williams (1987, 1988) y Zhu (1988), quienes alcanzaron conclusiones similares (Ford, y otros, 2007). Williams encontró que ambos estilos de evolución pueden ocurrir (**Figura 83**), pero que el segundo parece ser el caso más común. Zhu concluyó que el fengcong y el fenglin pueden desarrollarse de manera simultánea y en regiones vecinas, donde la condición favorecedora para el desarrollo del fengcong es un relieve relativamente alto y un nivel freático a gran profundidad (**Figura 81**). Tal como afirman Ford y Williams (2007), la transición de karst poligonal a karst residual es forzada cuando el nivel freático es alcanzado; fenómeno que representa un importante umbral hidrológico, por tanto que

controla la operación de los procesos disolutivos. Un mayor descenso en el nivel freático, como consecuencia de levantamiento tectónico y rejuvenecimiento, provoca que el karst residual se revierta a karst poligonal; un descenso menor o gradual del nivel freático promueve la extensión vertical de las torres por incisión alrededor de su base y el aplanamiento de la planicie de corrosión (Ford, y otros, 2007) (**Figura 66b**).

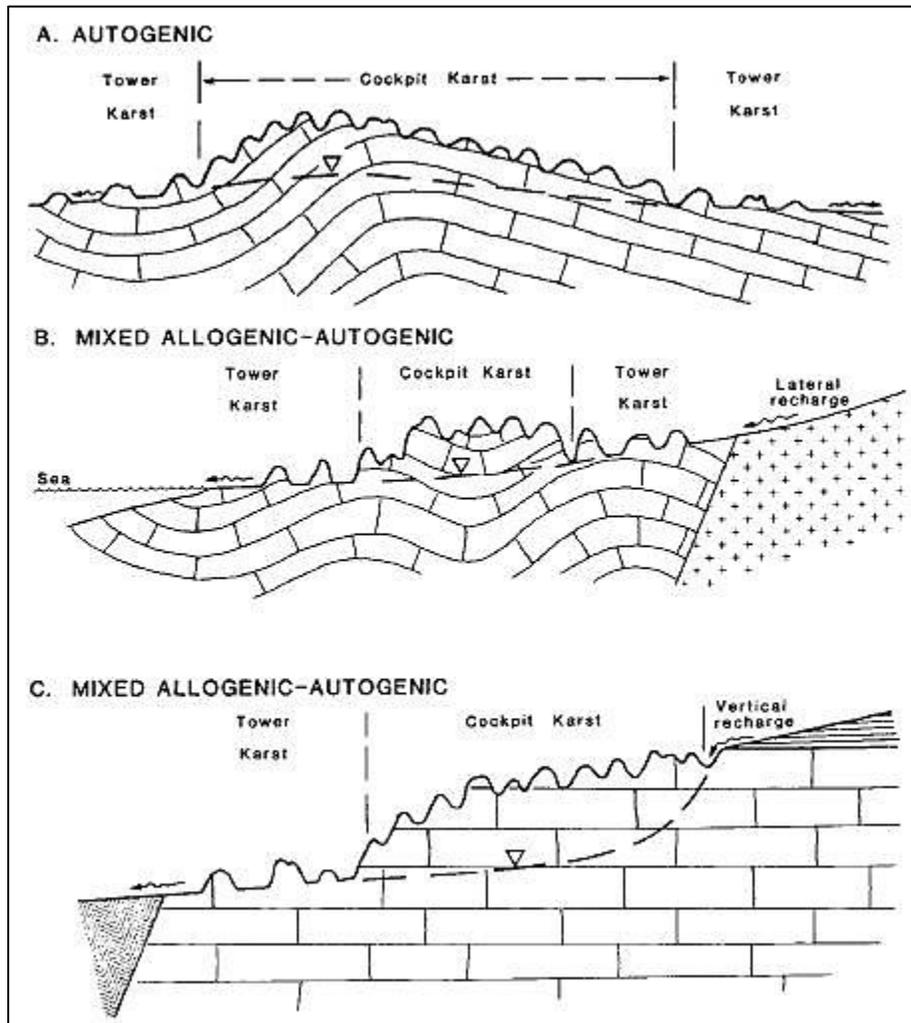


Figura 83. Ajustes autogénicos y mixtos autogénico-alogénicos asociados con el desarrollo de cockpit karst y karst residual
 (Williams, (1987) 2007)

En el primer caso, el desarrollo kárstico comienza en un terreno elevado con un nivel freático profundo. Posteriormente el karst poligonal disuelve gradualmente la gruesa masa carbonatada, al tiempo que el ajuste en el patrón de dolinas cesa casi completamente, y sólo es reactivado a través de estratos o zonas con diferente permeabilidad, de manera que omitiendo dicha excepción, la geometría poligonal permanece hasta que el nivel freático es alcanzado. Cuando esto ocurre, el epikarst entra en contacto con la zona freática, imposibilitando el drenaje vertical. Consecuentemente, el crecimiento vertical de las depresiones cesa y sus fondos comienzan a expandirse en sentido horizontal. La localización y la forma de las colinas residuales son heredadas desde la posición y forma de las colinas circundantes a las depresiones cerradas en la etapa anterior. La lluvia reduce las colinas residuales por corrosión, resultando en el aislamiento de las mismas y en la expansión de la planicie de corrosión. Esta evolución es comúnmente acelerada cuando los karsts son atravesados por ríos alógenos, a causa de la introducción periódica de grandes volúmenes de aguas de inundación sumamente agresivas. Las torres pueden

entonces ver aumentada la inclinación de sus laderas por el actuar del socavamiento basal, a través de muescas de inundación y cuevas basales, lo que a su vez resulta en el desarrollo de un acantilado inferior o una pendiente cóncava. Las inundaciones también pueden conducir a la agradación de la planicie de inundación, la cual puede enterrar la base de algunas torres (Ford, y otros, 2007) (**Figura 72**).

La evolución directa del karst residual, tiene como punto de partida común el levantamiento tectónico leve de una planicie de corrosión. Si el levantamiento es gradual y el nivel freático se encuentra a escasa profundidad, los ríos superficiales se mantendrán activos durante el levantamiento. Los ríos cortan gradualmente el terreno y los conos pueden desarrollarse en sus interfluvios. Cuando el levantamiento cesa o se ralentiza, la planicie de inundación se expande, aislando los conos. Sin embargo, si el levantamiento acelera su marcha el drenaje es capturado a profundidad y los valles se tornan secos, resultando en un karst de valle-fengcong (**Figura 62**), donde los conos son reducidos por retiro paralelo de pendientes (Xiong, (1992) 2007) en ausencia de pantanos o procesos fluviales. Incluso sin ríos superficiales, si el nivel freático se encuentra a poca profundidad, como en los flancos de un plegamiento situado a lo largo de las márgenes de corrientes de entrada o salida, los bloques de caliza pueden estar aislados por intersección de corredores. Si éstos se ensanchan hasta alcanzar el nivel freático, los bloques residuales se aíslan como torres o grupos de torres en la planicie. Como en el primer caso, la influencia de ríos alógenos acelera la tasa de desarrollo de las colinas residuales (Ford, y otros, 2007).

Ford y Williams (2007) mencionan que en el karst de Guilin es probable encontrar ambos casos de evolución de manera simultánea. Evidencias del primer caso son la herencia de formas, representada por la semejanza de pendientes entre las laderas del fengcong y fenglin (Tang, y otros, (2000) 2007); y los remanentes de cuevas a diferentes alturas de las torres, como evidencia de los sistemas de cuevas resultantes del descenso del nivel freático, en el curso evolutivo del karst poligonal. Prueba del segundo caso es la presencia de cuevas basales situadas a diferentes niveles de las torres, como resultado de un levantamiento periódico.

En el mismo tenor evolutivo, Gunn (2004) considera que el fluviokarst puede ser visto como un miembro final en una secuencia continua de paisajes kársticos superficiales, equivalente al karst poligonal, en donde toda la superficie es disectada por dolinas con un escaso o nulo rastro de valles previos.

Por su parte, Waltham (2008) sugiere un modelo evolutivo de siete etapas que explica la formación de las torres calizas del clásico karst tipo fenglin de Yangshuo, Guangxi (**Figura 84**). Dicho modelo incluye (según el autor) todos los factores esenciales para el desarrollo del fenglin. A su vez, el autor menciona acertadamente que niveles múltiples de cumbres y conos concordantes, indican que algunas áreas de fengcong tienen historias polifásicas complejas. Más allá de la propuesta evolutiva, este modelo pretende esclarecer de manera descriptiva e ilustrativa la confusión teórica existente dentro del karst tropical. Un aporte sustancial a la disciplina es el reconocimiento asignado a la terminología china (fenglin y fengcong) y su importancia en la teoría evolutiva del karst. Sin embargo, este modelo no finiquita en su totalidad dicha problemática, puesto que, tal como afirma el autor, en la naturaleza la secuencia evolutiva es por demás compleja debido a la interacción de diferentes factores regionales y locales (Waltham, (2004) 2004). Es probable que un conocimiento más profundo de la respuesta morfológica a factores litológicos, hidrológicos y tectónicos resuelva la incógnita.

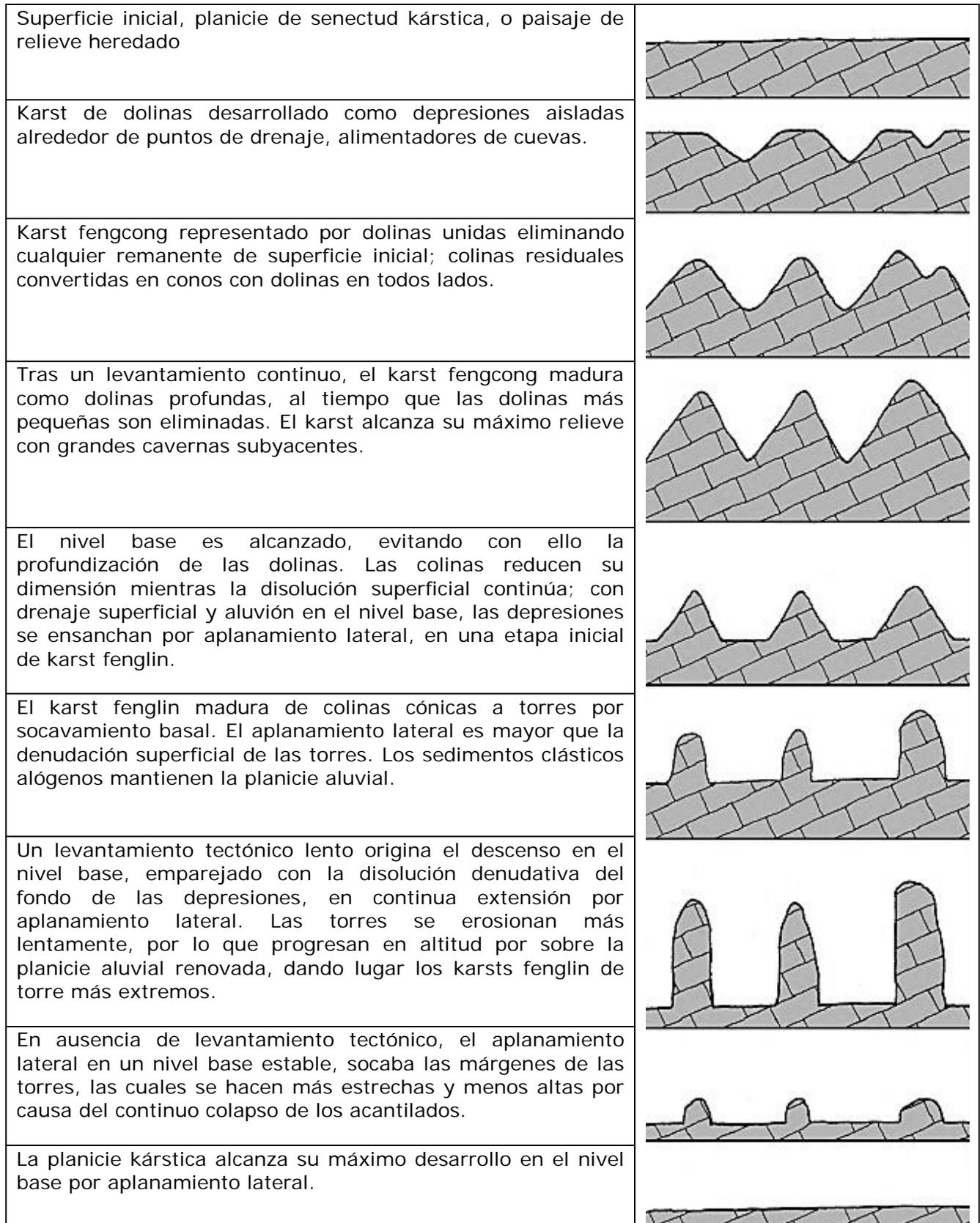


Figura 84. Secuencia diagramática, que si es completamente desarrollada, muestra etapas de evolución del paisaje, que van de una planicie inicial, a karst de dolinas, fengcong, fenglin y de nuevo a planicie kárstica (Waltham, 2008)

3.3.1.8 MODELOS COMPUTACIONALES DE EVOLUCIÓN DEL PAISAJE KÁRSTICO

Inicialmente desarrollados por Brook (1981) y más tarde por Ahnert y Williams (1997), Fleurant, Tucker y Viles (2008), los modelos computacionales de evolución del karst han demostrado ser capaces de emular diferentes procesos y paisajes kársticos. El diseño de modelos tridimensionales de la evolución kárstica a partir de principios generales, basados en resultados e investigación empírica previa, permite evaluar el comportamiento espacio-temporal de diferentes variables en la evolución del paisaje kárstico (Ford, y otros, 2007). Entre los resultados obtenidos de los modelos tridimensionales de Ahnert y Williams (1997) figuran: a) evidencia clara de la herencia morfológica dada por la evolución secuencial de los paisajes kársticos (**Figura 85** y **Figura 86**), b) prueba de que a nivel local, las altas tasas de disolución, causadas por flujo convergente, son suficientes para explicar el desarrollo del campo de dolinas y del karst poligonal (**Figura 85**), c) certeza de la importancia que tienen los efectos de la escorrentía divergente y convergente en la variación espacial de la denudación disolutiva, sobre todo en la evolución morfológica del karst poligonal y residual (**Figura 86**); y d) afirmación de los efectos de un súbito descenso del nivel base (levantamiento tectónico simulado), i.e. de que tras un súbito levantamiento tectónico, las colinas residuales del primer ciclo se convierten en las puntas de las colinas del segundo ciclo (**Figura 86**) (**Figura 66**). El trabajo de Fleurant, Tucker y Viles (2008), basado en la evaluación espacio-temporal de la disolución isotrópica y anisotrópica, demostró ser capaz de emular, con gran precisión, el desarrollo evolutivo del cockpit karst de Jamaica (**Figura 87**).

Como afirman Ford y Williams (2007), es claro que el modelado del paisaje kárstico está en su infancia, y que su potencial cognoscitivo de los fenómenos kársticos es amplio. A pesar de lo expuesto, estos modelos no han sido capaces de replicar paisajes típicos como el karst laberíntico o procesos de denudación kárstica asociados a sistemas alogénicos, por mencionar solo algunos. Excluyendo por obviedad el enorme potencial del modelado computacional y sistemas de información geográfica, es probable que el modesto alcance deliberativo de estos modelos se deba a dos razones:

1. El estado de desarrollo prematuro de la ciencia kárstica y falta de consenso teórico (en la karstología evolutiva en particular), disciplina que con el tiempo, probablemente provea parámetros más precisos de la evolución kárstica y sus interacciones más evidentes.
2. La falta de una teoría genética robusta, desarrollada principalmente a partir del análisis espacial de la expresión morfológica del karst y su relación con los diferentes factores geológico-geográficos.

Es menester mencionar que, tal como apunta Pedraza (1996), nada impide trabajar con modelos evolutivos a partir de observaciones directas, es decir, analizando asociaciones morfológicas actuales a lo largo de un espacio dado (una serie de regiones correlacionables), deducir secuencias o sucesiones de formas para esa zona durante un periodo de su historia geológica. Por tanto, es evidente que el establecimiento de una teoría evolutiva exclusiva del karst, acompañada por la comprensión rigurosa (cualitativa y cuantitativa) de su expresión morfológica en términos hidrogeológicos y geomorfológicos, posibilitará el desarrollo de la karstología comparada, la creación de una taxonomía artificial universal (por la naturaleza misma del karst), el desarrollo de la taxonomía natural del karst, y por ende, la fundamentación de una nueva sistemática karstológica.

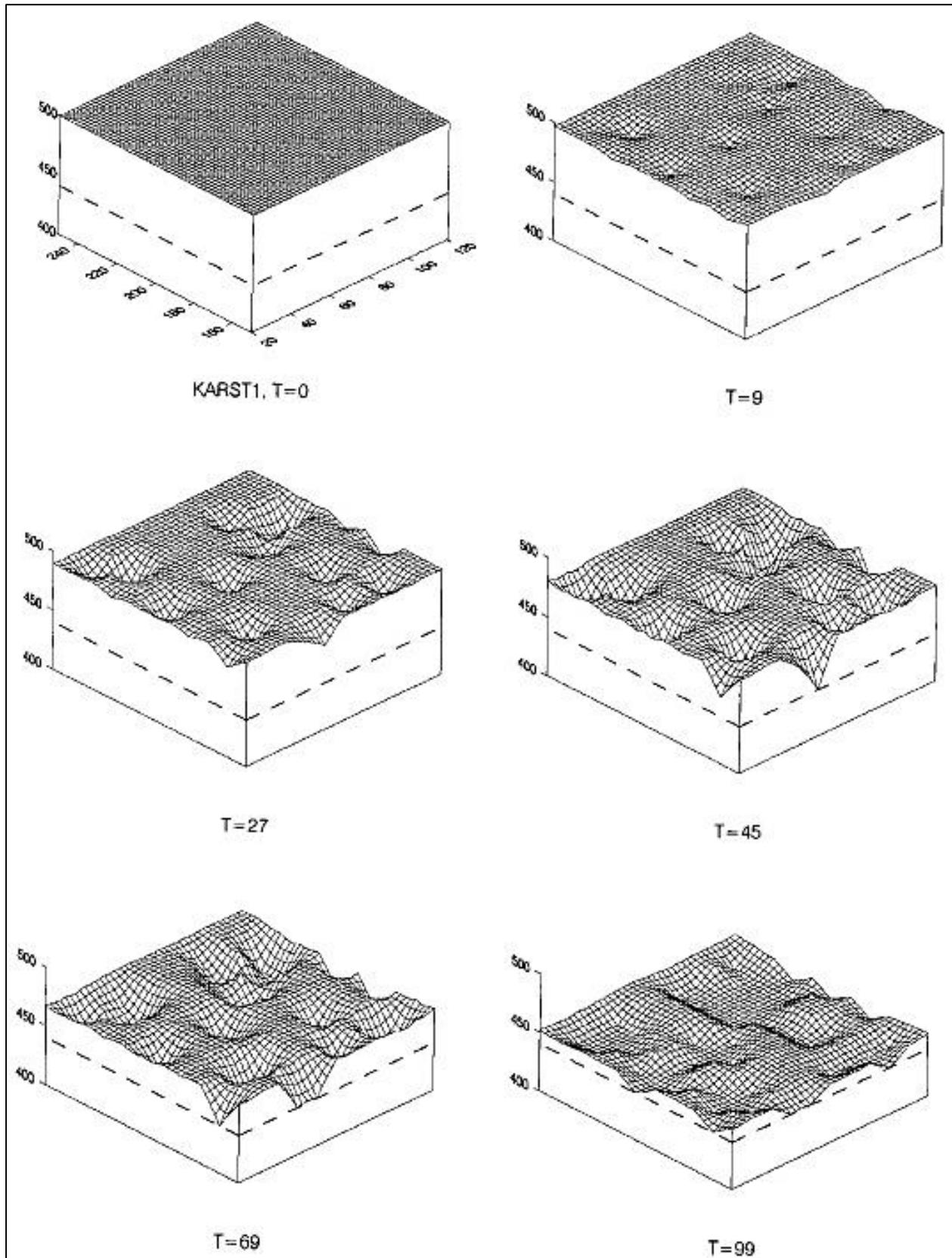


Figura 85. Bloques diagramáticos ilustrando etapas seleccionadas en unidad de tiempo, en el curso de acción del modelo (KARST1) de proceso de respuesta, emulando el desarrollo del paisaje kárstico (Ahnert, y otros, (1997) 2007)

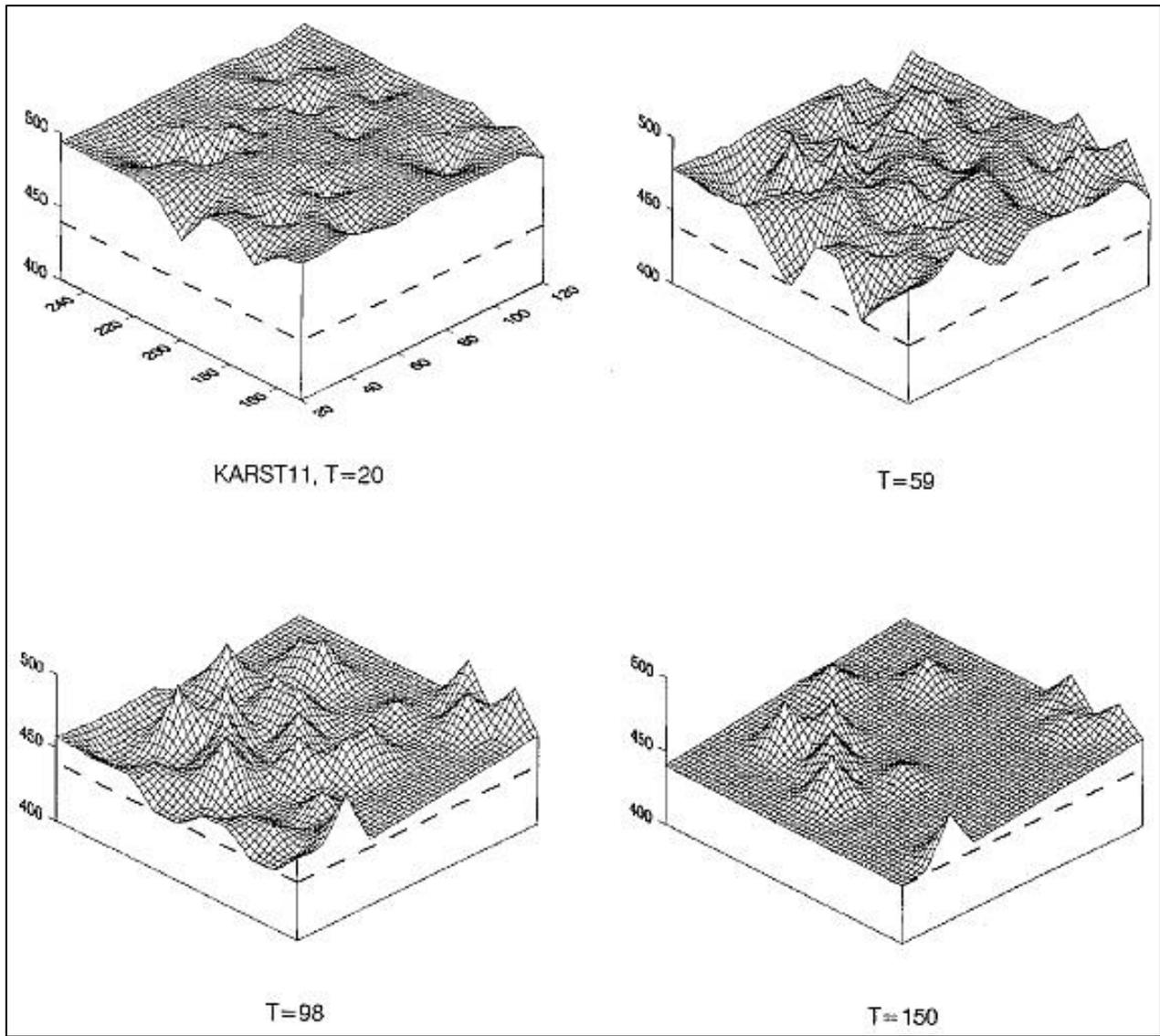


Figura 86. Bloques diagramáticos ilustrando etapas seleccionadas en unidad de tiempo, en el curso de acción del modelo (KARST11) de proceso de respuesta, emulando el desarrollo del paisaje kárstico

(Ahnert, y otros, (1997) 2007)

La pendiente de la planicie de corrosión en T=150 sigue el gradiente hidráulico

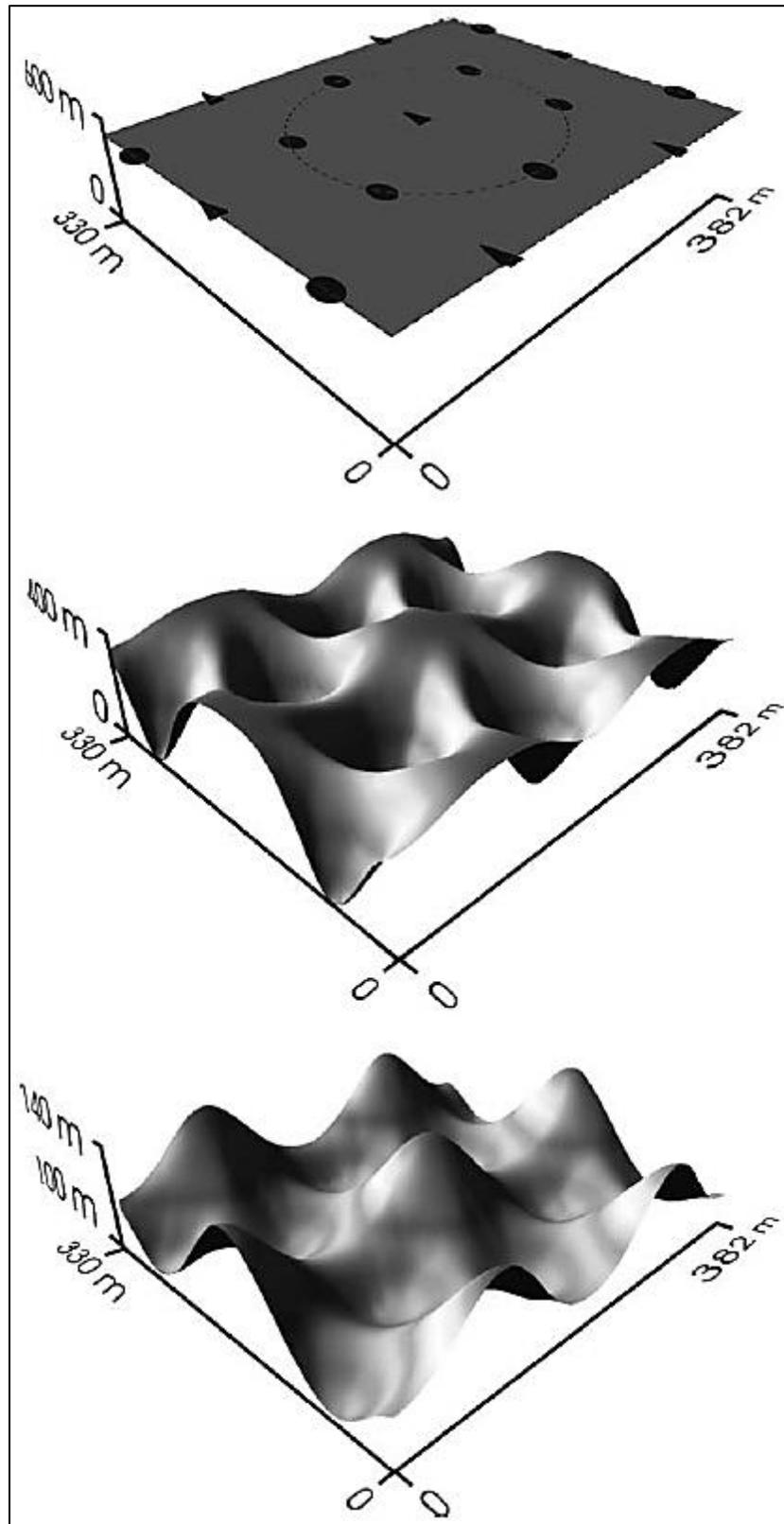


Figura 87. El modelo CHILD corriendo para la simulación morfológica del cockpit karst (Fleurant, y otros, 2008)

Arriba. Geometría inicial y condiciones limitantes del sistema.
En medio. La escorrentía superficial es dirigida inicialmente hacia las depresiones.
Abajo. La erosión es computada hasta el fin de la simulación.

3.3.2 ESTUDIOS PRECEDENTES

Los estudios del karst tropical en el Parque estatal de la Sierra de Tabasco son escasos. Hasta la fecha, el conocimiento geomorfológico del área ha sido provisto por las investigaciones de Gerstenhauer (1960), Espinosa Pereña (1990) y McDonald (2007), principalmente. Estudios geomorfológicos y geoecológicos de carácter regional han suministrado caracterizaciones generales del relieve kárstico del PEST (Mateo Rodríguez, 1981) (Lugo Hubp, y otros, 1992) (Ortiz Pérez, y otros, (2005) 2005) (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006) (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2011), entre otros. Otros estudios de temática geológica y biológica también han contribuido al conocimiento general del área (Salazar Conde, y otros, 2004) (Islas Tenorio, y otros, 2005) (Aguilar, 2005) (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006) (Padilla y Sánchez, 2007). A continuación, y de manera cronológica, se exponen las principales aportaciones de dichos estudios.

En su estudio del karst tropical de las sierras Poaná y Tapijulapa, descrito genéricamente como kegelkarst o karst de conos, Gerstenhauer (1960) coincide en gran parte con la evaluación geológica descrita en la sección 2.5.1.1. Es precisamente a la geología del área, a la que el autor atribuye la diferencia de altura evidente entre el centro y la periferia de los macizos kársticos. De igual manera reconoce el control que ejercen las líneas de intersección tectónica NW-SE y NE-SW en la orientación del fracturamiento, de las colinas kársticas y de los ríos superficiales como el de la Sierra o Tacotalpa (**Figura 88**). La altura de los conos (en sentido general) varía entre 25 y 150 m, con un diámetro de hasta 80 m. Cuanto más se adentra en la montaña la pendiente es menor y los cortes entre los conos ya no llegan al nivel base. Con frecuencia, las cúpulas se encuentran salpicadas por pequeñas depresiones cerradas. Los macizos kársticos tienen una superficie irregular, cuya silueta está determinada por las colinas aflorantes. Las dolinas en los bloques kársticos presentan una geometría cóncava. A menudo forman uvalas. Las condiciones geológicas de fracturamiento pueden llevar a la formación de calles kársticas. El tipo de colina kárstica es producto del trazado particular de las dolinas (Gerstenhauer, 1960) (**Figura 90**).

Rasgos geomorfológicos notables de origen tectónico son la intromisión acuñada del río Poaná en la planicie kárstica y la presencia esporádica de poljes de borde, como el localizado entre el cerro La Iglesia y la Sierra Tapijulapa (**Figura 90**). La expansión de los poljes es relativamente rápida, evidencia de ello es su papel como planicies de inundación, alimentadas por ríos alógenos e incluso autóctonos, y la presencia de numerosos ponores estrechos en las zonas de contacto con los macizos kársticos. Estos macizos limitan en parte con poljes y planicies de corrosión, representados por sedimentos margosos del Eoceno, pero también con depósitos aluviales recientes (**Figura 88**). Dichos contactos están relacionados con la posición del lecho calizo subyacente y concordante con las colinas residuales y los macizos expuestos. De manera que los poljes de borde y planicies de corrosión hablan de un retiro gradual del frente kárstico por aplanamiento horizontal, mientras que el contacto directo del último con los depósitos aluviales, denota una historia compleja de episodios de aplanamiento y acumulación como respuesta a múltiples ajustes en el nivel base (Gerstenhauer, 1960).

A gran escala es posible notar que los poljes y planicies kársticas no son completamente planos. Estas geofomas presentan una gruesa capa de aluvión, de 1 a 2 m de altura, la cual se expresa como colinas suavemente inclinadas e intercaladas con afloramientos calizos, donde las partes más profundas se encuentran en la base de las colinas residuales. Es probable que estas irregularidades se deban al gran aporte de aluvión relacionado con los ajustes del nivel freático en el Pleistoceno (Gerstenhauer, 1960). A su vez, el autor reconoce la acumulación de sedimentos calcáreos al pie de las colinas residuales, principalmente en los flancos kársticos cercanos a Estación Poaná y Poposá (**Figura 89**). Estas acumulaciones pueden presentarse desnudas o cubiertas por una densa vegetación arbórea.

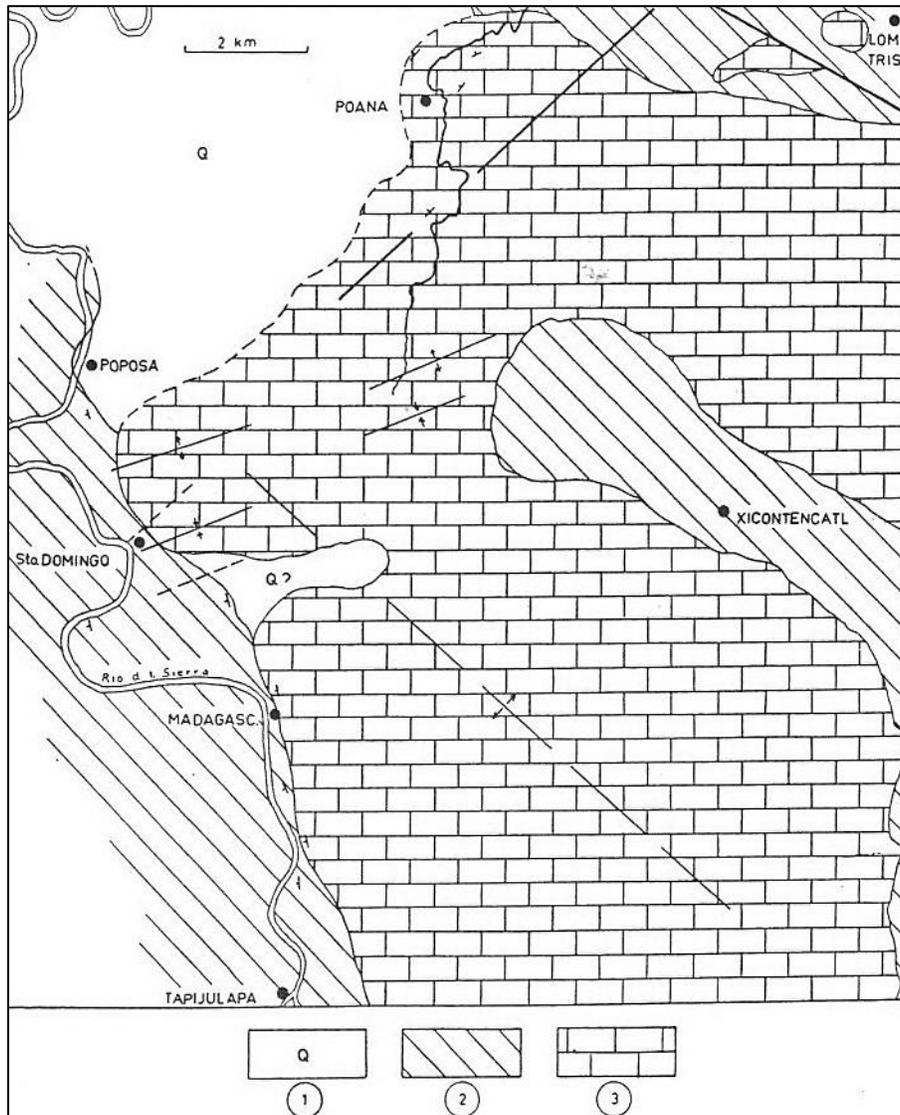


Figura 88. Descripción geológica del sur de Tabasco, Gerstenhauer (1960)
 (Gerstenhauer, 1960)

1. Depósitos del Cuaternario. 2. Margas del Eoceno (Capa Chicontepec). 3. Calizas del Cretácico Medio (Sierra Madre-Caliza).

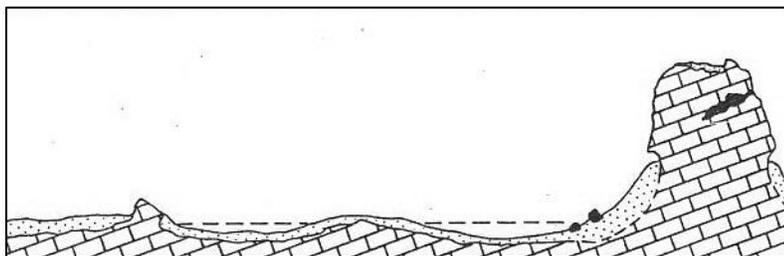


Figura 89. Perfil esquemático del karst en las inmediaciones de Estación Poaná y Poposá, Gerstenhauer (1960)
 (Gerstenhauer, 1960)

A primera vista, el área semeja un karst totalmente cónico, sin embargo, el estudio a detalle de las formas positivas llevó a Gerstenhauer (1960) a reconocer diferencias geométricas notables. Con base en ello, y con el propósito de ahondar en la morfogénesis, el autor distingue cuatro tipos principales de colinas kársticas (**Figura 91**):

Tipo A. Las colinas tienen forma semiesférica (**Figura 91**). La pendiente es relativamente baja (20° a 25°). Se encuentran casi totalmente cubiertas por suelo. En asociación, las geofomas tipo A nunca alcanzan el nivel freático. Sus límites pueden ser escarpados cuando constituyen flancos kársticos, o de transición cóncava a colinas tipo B. La altura relativa y el diámetro son muy

diferentes. Incidente en las partes centrales de los macizos kársticos (Gerstenhauer, 1960) (**Figura 90**). Correspondiente con la colina kárstica residual tipo cúpula (**Tabla 16**).

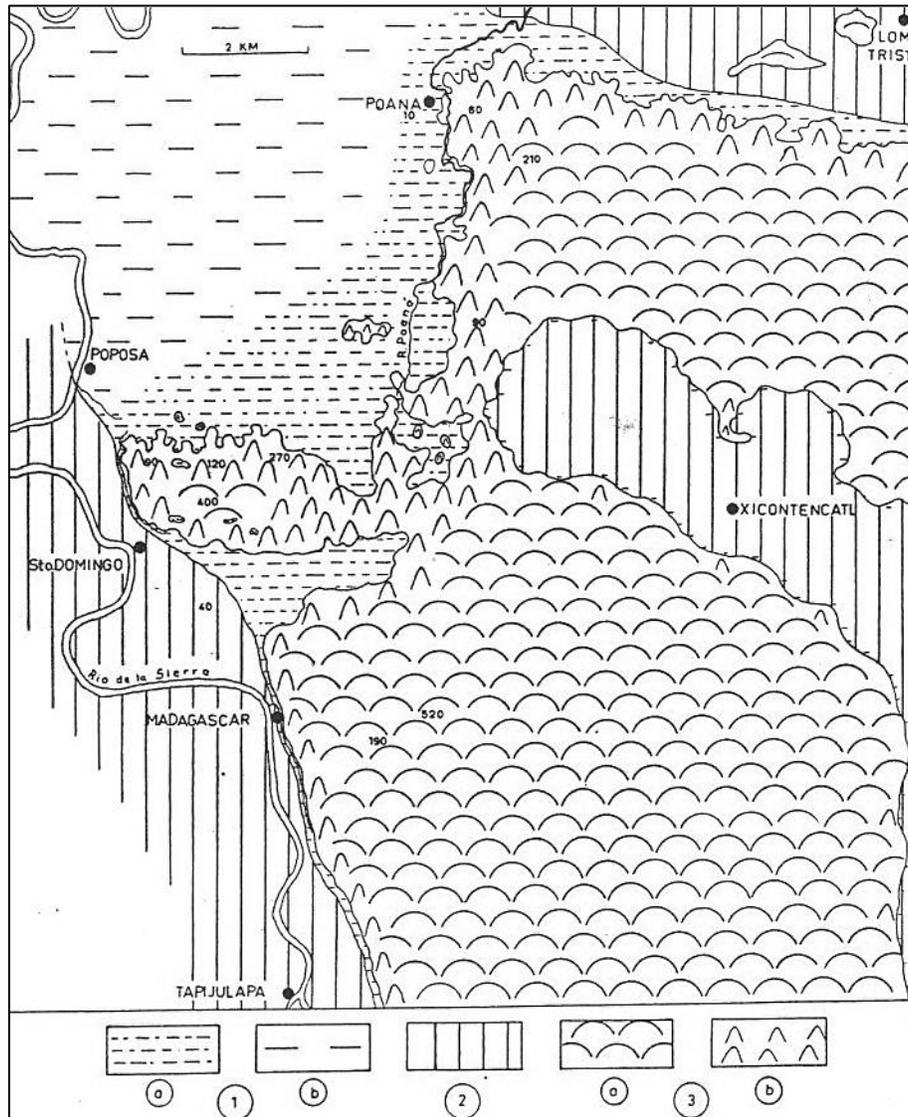


Figura 90. Descripción morfológica general, Gerstenhauer (1960)
 (Gerstenhauer, 1960)

1. Planicies
 - a) Planicies de corrosión en zonas pantanosas.
 - b) Planicies aluviales.
2. Lomeríos del Terciario.
3. Áreas kársticas.
 - a) Cúpulas con ángulos de pendiente relativamente bajos.
 - b) Formas escarpadas con predominio de torres.

Tipo B. Se caracterizan por tener forma de torre y un acentuado socavamiento basal, de hasta 5 m por encima del acantilado (**Figura 91**). Los depósitos basales se inclinan hacia la periferia entre 2° a 5°. Presentan estalactitas y cuevas basales, las cuales son alcanzadas en los periodos de inundación. La cubierta edáfica es escasa y solamente se encuentra en el techo de las colinas, el cual es más o menos plano. Incidente inmediatamente en el borde de los macizos kársticos (Gerstenhauer, 1960) (**Figura 90**). Correspondiente con la colina kárstica residual tipo torre (**Tabla 16**).

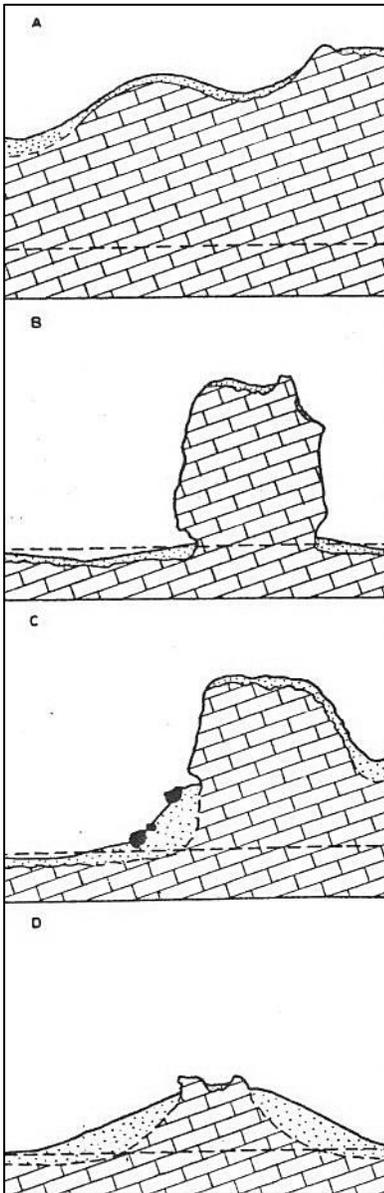


Figura 91. Representación esquemática de los principales tipos de colinas kársticas, Gerstenhauer (1960)
 (Gerstenhauer, 1960)

Tipo C. Son formas en parte cóncavas y en parte escarpadas (**Figura 91**). Más frecuentes que las colinas tipo B. En la base de los flancos escarpados es común encontrar fajas de sedimentos calizos con un ancho de entre 60 a 100 m, altura de 5 a 10 m e inclinación de 40° a 55° (**Figura 92**). El suelo se encuentra salpicado por bloques calcáreos de varios metros de diámetro, conformando un segundo cinturón de 40 a 80 m de ancho. El contacto entre los sedimentos y el escarpe calizo exhibe surcos cuya profundidad varía entre 0.5 m y 2 m. En los escarpes, la caliza se presenta en forma pura o poco intemperizada, por el contrario de los sedimentos intemperizados cuya coloración va de marrón a rojo. Incidente a la orilla de los macizos kársticos, pero la mayoría aún en contacto con colinas vecinas (Gerstenhauer, 1960) (**Figura 90**). Correspondiente probablemente con la colina kárstica residual tipo mogote (**Tabla 16**).

Tipo D. Con cerca de 10 m de altura, estas colinas presentan pendientes relativamente bajas (30°) (**Figura 91**). La caliza aflora únicamente en sus cumbres, mientras que los escombros denudativos cubren casi totalmente la colina. La pendiente es casi recta. Incidente como elementos aislados en los poljes y planicies de corrosión (Gerstenhauer, 1960) (**Figura 90**). Correspondiente con la colina kárstica residual tipo cono (**Tabla 16**).

Con esta tipología, Gerstenhauer pone en evidencia la gran riqueza morfológica del área (**Figura 90**). La diferencia entre las crestas del centro y borde de los macizos kársticos recuerdan el karst de Maros, Sulawesi (**Figura 40**). Las colinas tipo C semejan las torres kársticas al sur de la región de Tonkin, Vietnam (Wissmann, (1954) 1960). Es probable que las diferentes morfologías determinadas estén presentes en cualquier parte del área de estudio (Gerstenhauer, 1960).

El endokarst se ha descrito en los frentes kársticos y en la base de las colinas kársticas residuales, principalmente. Se caracteriza por la presencia de estalactitas. El karren es muy irregular y se reduce a aquellas áreas donde afloran estructuras cristalinas, intercaladas tanto en calizas como en dolomías (Gerstenhauer, 1960).

Las condiciones climáticas del área alimentan la densa selva tropical, lo que sumado al material parental ha contribuido en la formación de suelos margosos marrones-rojizos, ricos en materia orgánica. Su grueso fluctúa entre 10 y 60 cm, con pendientes de hasta 53°. En áreas limítrofes del macizo calcáreo se reconocen margas de color marrón oscuro. Estudios bioquímicos de muestras de suelo en campo se detallan en Gerstenhauer (1960).

La cobertura vegetal original se restringe a las áreas de más difícil acceso. De ahí en fuera la vegetación es introducida con fines de pastoreo o cultivo de cacao, plátano, caña de azúcar, arroz y maíz. La arcilla roja de los suelos posee una gran capacidad de retención de agua, lo que junto con el clima, hace posible la existencia de la selva tropical. Dicha cobertura edáfica hace que la circulación hídrica en el epikarst sea muy lenta. El efecto filtrante del suelo y la red fluvial endokárstica dificulta la preservación de aguas contaminadas (Gerstenhauer, 1960).

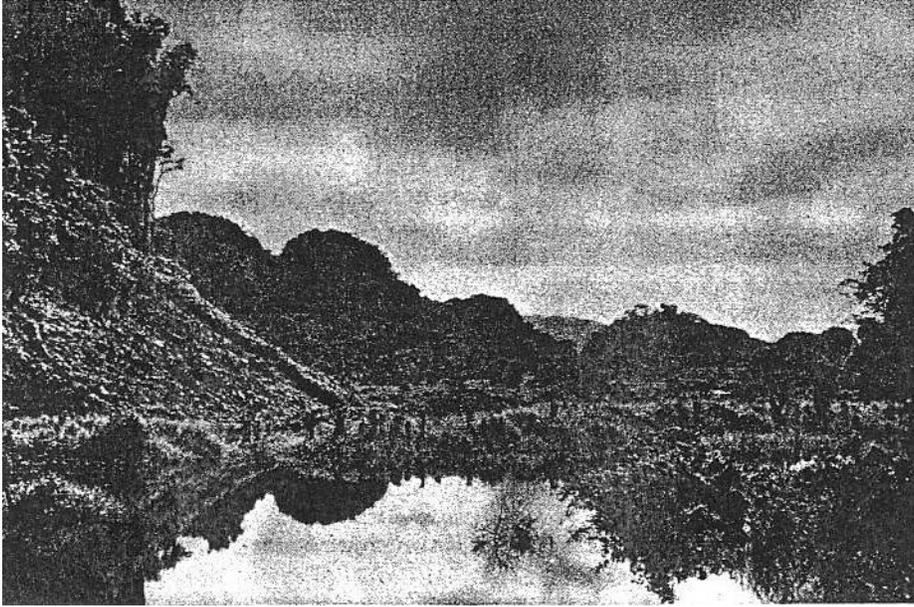


Figura 92. Colina tipo C en la orilla pantanosa del karst, Gerstenhauer (1960)
 (Gerstenhauer, 1960)

ellos (Gerstenhauer, 1960).

Los bordes kársticos con frecuencia se encuentran inundados, dando lugar a pantanos. Una simple lluvia torrencial puede elevar el nivel del agua en 10 cm. La pendiente de los ríos superficiales es muy baja y la mayoría de ellos han alcanzado el nivel freático, casos específicos son los ríos Tacotalpa y Poaná. Por la naturaleza del karst, los macizos calcáreos adolecen de aguas estancadas. Solo en fisuras incipientes, ponores y cuevas basales es posible la acumulación temporal de agua, prueba de ello es la abundante vegetación existente en

Sin duda la disolución kárstica en el área de estudio es rápida e intensa. Las aguas agresivas del sistema son resultado de la densa concentración de humus en el suelo, gran actividad microbiana y probablemente de procesos de nitrificación (Gerstenhauer, 1960). Los resultados del muestreo de agua se ilustran en la **Tabla 20**.

Tabla 20. Muestreo de agua en el sur de Tabasco, Gerstenhauer (1960)

| | mg de $CaCO_3$ /Litro | Valor pH | Temp. °C |
|--|-----------------------|----------|----------|
| Agua de lluvia (análisis anual) | - | 6.0-6.3 | 23 |
| Agua de goteo (análisis anual) | rastros | 6.5-6.8 | 23 |
| Agua en fisuras. 12 horas después de la lluvia, debajo de la superficie cubierta por vegetación densa. | 121 | 7.5 | 25 |
| Agua de escurrimiento en flancos escarpados, en parte cubiertos de musgos y líquenes (análisis anual) | 111-149 | 7.4-7.6 | 25 |
| Agua de fuentes kársticas en el borde de los macizos calcáreos (análisis anual) | 154-160 | 7.5 | 23 |
| Agua del río Poaná a la salida del macizo kárstico (análisis anual) | 141-146 | 7.5 | 24 |
| Agua estancada de los pantanos al pie del karst, en el contacto con las calizas (muestras extraídas a unos 5 m del frente kárstico) (análisis anual) | 113-120 | 6.4-6.8 | 25 |

El análisis detallado de las calizas muestreadas puso en evidencia su variable impureza. Tras someter cada muestra a un proceso controlado de erosión fluvial de 48 horas, y a 20°C, se pudieron distinguir dos tipos de caliza en función de su dureza mecánica. Las más duras, dejando residuos de entre 23% y 14% de la masa original, y las más suaves dejando de 15% a 19% (Gerstenhauer, 1960).

En el Mioceno, probablemente antes del Plioceno, la zona kárstica parece estar ya definida. Más tarde las transgresiones del Golfo de México pudieron haber modelado las margas suprayacentes. Los sinclinales formaban paisajes fluviales, mientras que los anticlinales denotaban paisajes sumamente corrosivos. El proceso de erosión de las rocas insolubles era más rápido que el de las rocas carbonatadas. Es por ello que es posible encontrar margas del Paleógeno dispuestas entre las calizas del Cretácico. Sin embargo, el proceso de karstificación diferencial ya había comenzado antes del afloramiento de las calizas desnudas. El crecimiento del

drenaje subterráneo, el fracturamiento tectónico y la estabilización y acidificación edáfica por conducto de la densa vegetación arbórea, fueron cruciales para el desarrollo del karst tropical superficial (Gerstenhauer, 1960).

Una de las razones que explican la variabilidad morfológica de los karsts tropicales es la presencia simultánea de etapas evolutivas de madurez y senectud. Agrupar a todos los karsts tropicales dentro del término "karst cónico" no es más que una simplificación basada en las generalidades morfológicas. Como es de esperarse, los estudios geomorfológicos detallados podrán proporcionar una mejor comprensión de la génesis de estos paisajes y de su diversidad (Gerstenhauer, 1960) (**Figura 90**).

Llama la atención que el área de estudio carece de colapsos, lo que posiblemente se deba a su condición de sistema abierto. Las aguas agresivas en conjunción con la pureza y aislamiento relativo de los macizos kársticos, hacen que el trabajo disolutivo exo y endokárstico se ejecute de forma libre y sin alteraciones externas, imposibilitando así la formación de dolinas de colapso (Gerstenhauer, 1960).

En el sur de Tabasco, la coexistencia espacial de diferentes etapas de desarrollo kárstico está determinada por la situación de los bordes calizos. Los macizos kársticos alejados del nivel freático (colinas tipo A) denotan etapas de madurez. Los flancos en contacto directo con surgencias de agua vadosa o freática, exhiben un socavamiento basal acelerado que resulta en la preservación de colinas tipo B, en contraste, el aislamiento hídrico de los flancos intensifica la degradación de las laderas, disminuyendo su pendiente, y dando pie a colinas tipo C y D. Así, los diferentes tipos de colinas kársticas representan distintas fases de desarrollo. Las colinas tipo B, C y D son formas corrosivas adyacentes. Las torres son particularmente duraderas y se disponen mucho más a menudo en las planicies de corrosión. La conversión de colinas residuales a conos de escombros aumenta la dimensión de sus bases, dejando entrever solo parte del material de origen (Gerstenhauer, 1960) (**Figura 91**).

La fragmentación de los límites calizos es muy rápida, esto se debe principalmente a que en etapas de senectud (una vez alcanzado el nivel freático) la erosión deposita o socava el material parental constantemente, aumentando o disminuyendo la extensión de los poljes de borde y planicies de corrosión. A su vez, el contacto diferencial con las aguas vadasas o freáticas, resulta en incisiones o aplanamientos intermitentes de las planicies calcáreas (Gerstenhauer, 1960).

Las planicies de corrosión, formadas por margas impermeables se extienden más ampliamente al norte de la sierra Tapijulapa y oeste de la sierra Poaná (**Figura 90**). El modelado cuesta arriba de los ríos alógenos y la erosión fluvial cuesta abajo de los autóctonos, no son tan intensos como la disección vertical y el desarrollo de la red fluvial subterránea en los macizos kársticos (Gerstenhauer, 1960).

El autor añade que el desarrollo de investigaciones detalladas en otros karsts tropicales, posibilitará la comparación y enriquecimiento de su caracterización geomorfológica del karst al sur de Tabasco, además de reconocer más ampliamente el "tesoro" kárstico presente en el área de estudio.

En su propuesta de clasificación del karst de México, Espinosa Pereña (1990) hace referencia del karst del sur de Tabasco dentro de la región definida como sierras y altiplano plegados del norte de Chiapas. Así, se menciona que en las porciones de alturas más bajas (al norte del altiplano de San Cristóbal) se encuentra un karst de tipo tropical, con abundancia de todos los tipos de formas, predominando los conos (keggels), especialmente en la región de Teapa, Tabasco. El endokarst de esta porción ha sido poco explorado. En las regiones de Teapa y Tacotalpa, Tabasco, varias cavidades funcionan como resurgencias con caudales importantes, entre otras el Sistema Agua Blanca, con más de 5 Km explorados a la fecha. Además se conocen

varias cavernas fósiles y semifósiles en los mogotes y conos (keggels) de Teapa, como la Gruta de Coconá, de origen freático (Espinosa Pereña, 1990).

McDonald (2007), en su estudio preliminar del karst del sur de Tabasco, reconoce la existencia de colinas residuales de tipo torre y terrazas corrosivas.

En sentido amplio, Mateo Rodríguez (1981) determina el relieve del área de estudio como karst de cúpulas; Lugo Hubp, y otros (1992) como cerros cónicos, dómicos o mogotiformes; Ortiz Pérez, y otros (2005) 2005) como laderas septentrionales de la Sierra Norte de Chiapas; la Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente (2006) como sierra kárstica (véase **2.5.1.2**); y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2011) como lomeríos predominantemente calcáreos, en los que se manifiestan rasgos muy desarrollados de karst tropical de cerros cónicos.

De manera complementaria, el área de estudio es reconocida por sus cerros dómicos y cónicos (de la Sierra Madrigal en particular) (Salazar Conde, y otros, 2004); por sus montañas escarpadas con alto desarrollo kárstico que generalmente constituyen el núcleo de anticlinales (Islas Tenorio, y otros, 2005) (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006) (véase **2.5.1.1.3**).

Aportes de carácter exclusivamente geológico, son la descripción cronológica de los eventos tectónicos que afectaron las cuencas de Sierra de Chiapas y Macuspana (Padilla y Sánchez, 2007) (**Figura 4**); y el estudio geológico de la estructura Coconá por parte de Aguilar (2005).

Entre las observaciones de Aguilar (2005), figuran el reporte de óxidos de calcio en el exterior de las grutas de Coconá, y la presencia de tanatocenosis de rudistas del Cretácico Superior entre los estratos de las canteras de dolomía (**Figura 93**), al pie del cerro Coconá (**Figura 94**).



Figura 93. Tanatocenosis de rudistas del Cretácico Superior
(Aguilar, 2005)

Con base en el análisis de fotografía aérea e imagen de satélite, Aguilar (2005) calculó en 11.5 Km² el área de emplazamiento de la estructura dómica de Coconá (Aguilar, 2005) (**Figura 96**). A su vez, la actitud de las capas de dolomías se calculó en 20° de buzamiento al Norte (**Figura 95**). Estos cálculos se acompañan por observaciones de la inclinación general de los estratos en diferentes frentes kársticos (**Figura 97**) (**Figura 98**). Como conclusión, el autor establece un modelo del origen del levantamiento "Coconá", esquematizado en la **Figura 99**.

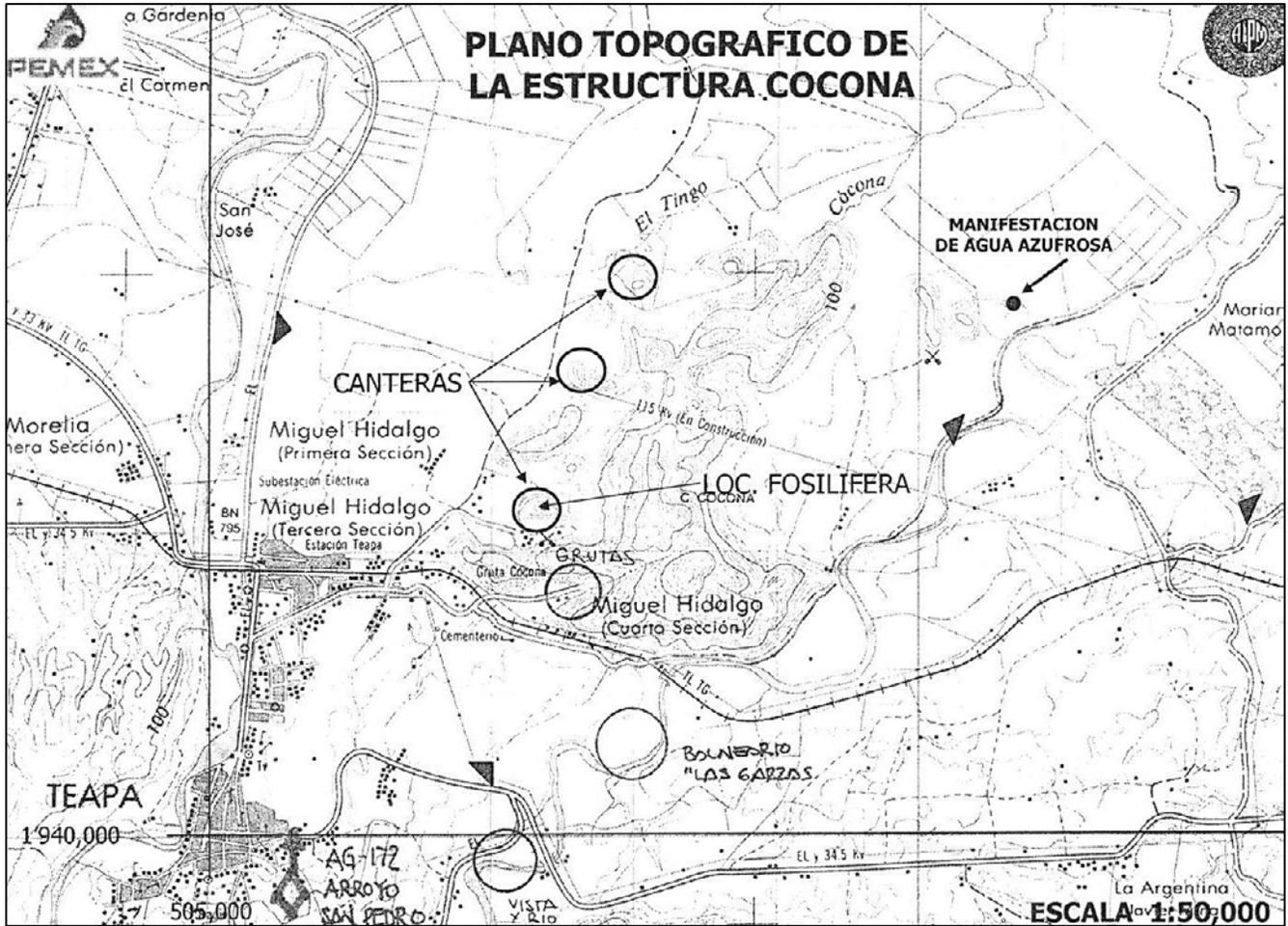


Figura 94. Plano topográfico de la estructura Coconá (Aguilar, 2005)

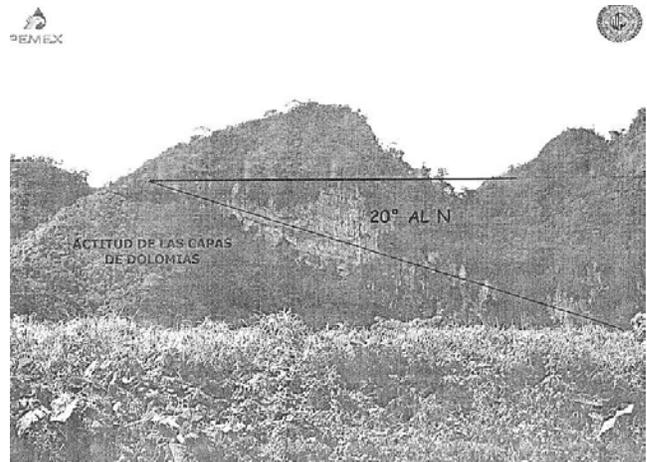
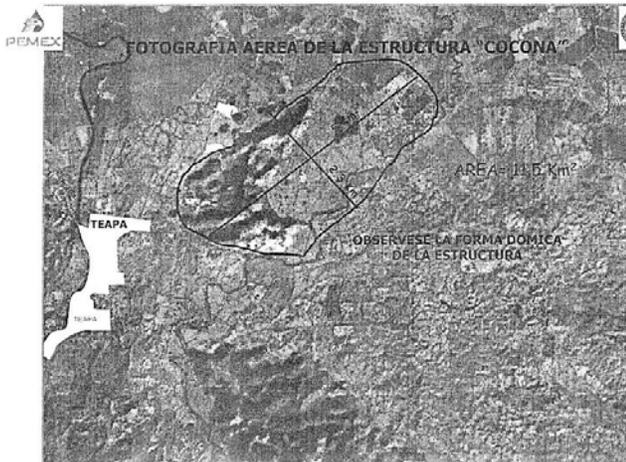


Figura 96. Fotografía aérea de la estructura Coconá (Aguilar, 2005)



Figura 95. Actitud de las capas de dolomías (Aguilar, 2005)

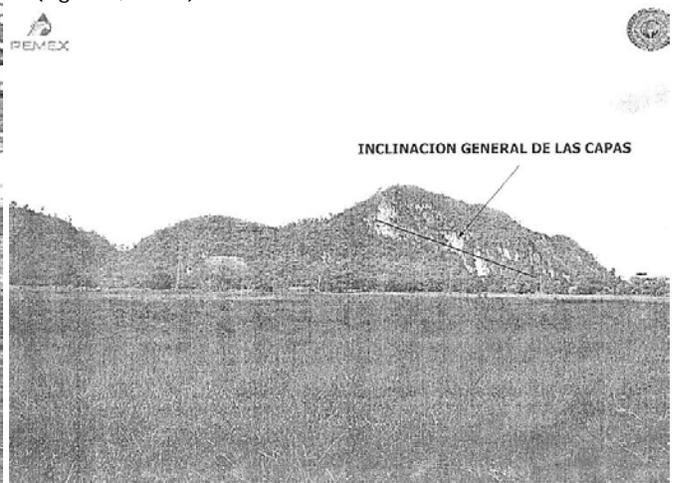


Figura 98. Inclínación de las capas al noreste de la estructura Coconá (Aguilar, 2005)

Figura 97. Inclínación de las capas al norte de la estructura Coconá (Aguilar, 2005)

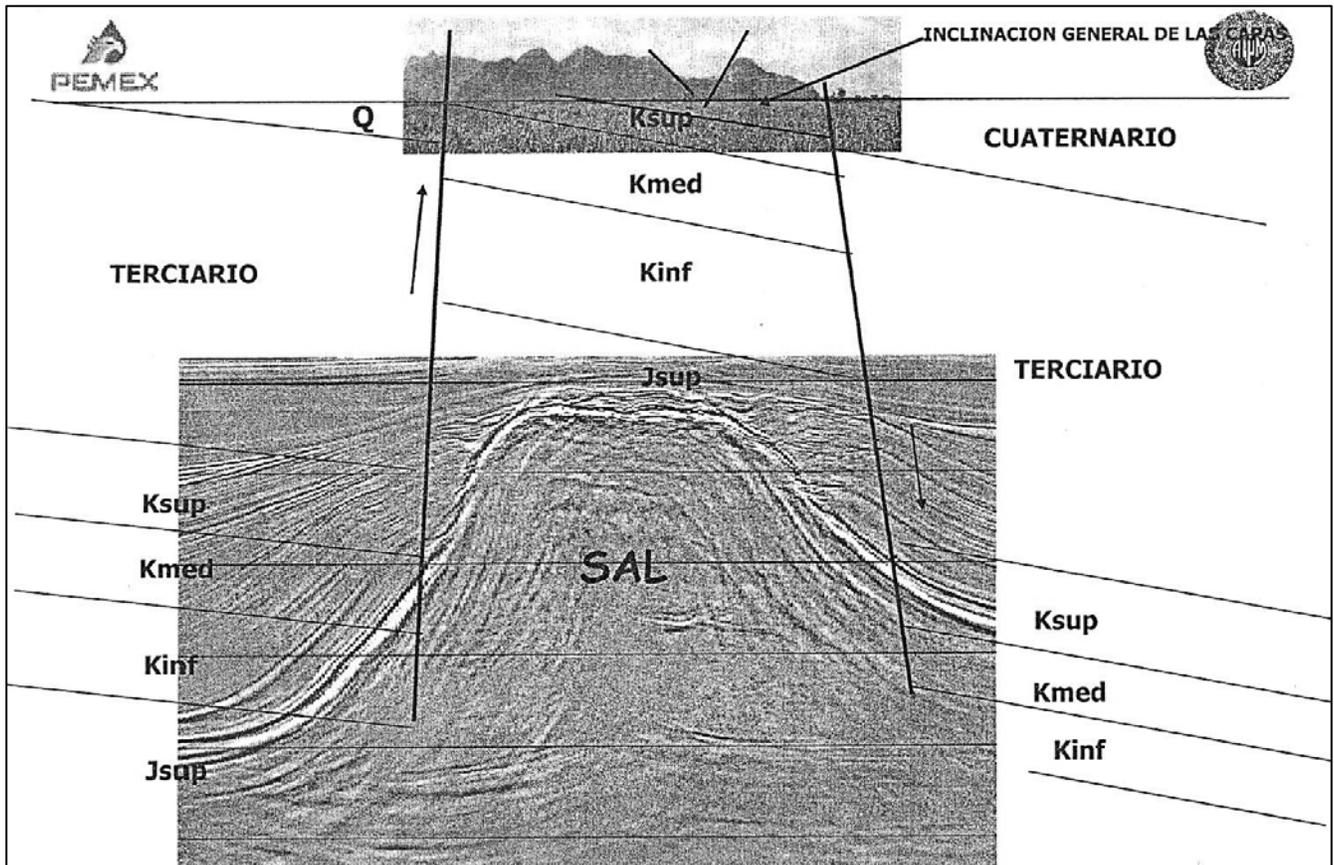


Figura 99. Modelo del origen del levantamiento "Coconá" (Aguilar, 2005)

3.3.3 EXTRACCIÓN Y ANÁLISIS DE LINEAMIENTOS

El análisis de lineamientos permite identificar los patrones de fracturamiento o de fallamiento que presenta el área en cuestión (Silva Romo, y otros, 2006). Esto a partir de análisis estadísticos y elaboración de gráficos de frecuencia, indicando las direcciones dominantes (Chuvienco Salinero, 2008).

De acuerdo con los cuatro puntos de relación proceso-roca-morfología, sugeridos por Ford y Williams (2007) (véase **3.2.1.10**), la litología y estructura geológica juegan un papel de suma importancia en el desarrollo de las morfologías y paisajes kársticos. Además, como se expuso en las secciones **3.2.1.6** y **3.3.1.6**, la mayoría de las formas kársticas mayores positivas y negativas (e.g. colinas residuales y dolinas) se orientan en función de los trazos de fracturamiento o lineamientos. Retomando lo sugerido por Haryono y Day (2004), la identificación de las variaciones geológicas, en este caso de los patrones de fracturamiento y fallamiento, y la diferenciación o determinación de las geoformas kársticas asociadas, permiten comprender de manera más refinada el paisaje kárstico y su diversidad morfológica.

Algunos de los métodos más comunes para detectar rasgos geológicos de gran radio de cobertura son la cartografía de lineamientos, el estudio de erupciones volcánicas, la localización de acuíferos o de yacimientos minerales, y el seguimiento de la dinámica fluvial. De estos aspectos, la cartografía de lineamientos ha sido el más profusamente empleado en análisis visual (Chuvienco Salinero, 2008) y uno de los más recurrentes dentro de la geomorfología kárstica.

Los trazos de fracturamiento o lineamientos pueden extraerse, a partir de imágenes de satélite, fotografías aéreas, imágenes radar o modelos digitales de elevación. Para ello, existen diferentes métodos de obtención. El más ampliamente utilizado es el reconocimiento de lineamientos a partir de interpretación visual directamente sobre la imagen, mediante el trazado analógico o digital. Se aprecian como rasgos lineales, cuando son resaltados por algún proceso erosivo o edáfico. Así, los lineamientos se pueden reconocer por la presencia de vegetación, o por el desarrollo de segmentos rectilíneos de las corrientes fluviales y por la presencia de rasgos morfológicos lineales como puede ser un escarpe. Los segmentos rectilíneos de las corrientes fluviales se desarrollan porque las discontinuidades ofrecen una menor resistencia a los agentes erosivos y son acentuadas por el agua durante su escurrimiento (Silva Romo, y otros, 2006). En los terrenos kársticos, el relleno soluble de calcita puede dar origen a una expresión negativa de los rasgos alineados. También es posible reconocer fallas y fracturas con base en alineaciones de dolinas en rocas solubles, ya que estos rasgos se desarrollan preferentemente en la intersección de las discontinuidades (Silva Romo, y otros, 2006).

Otros métodos de identificación de lineamientos se basan en procedimientos específicos asistidos por ordenador y software especializado. Dos ejemplos son el análisis multiespectral de imágenes de satélite y la extracción automática de lineamientos a partir de imágenes de satélite o modelos digitales de elevación. Cada uno de estos métodos posee diferentes ventajas y desventajas, en función del tipo de relieve a analizar.

La obtención de lineamientos en el área de estudio consistió tanto de reconocimiento por interpretación visual como de extracción automatizada, ambos sobre la plataforma digital del software ArcGIS 10.

3.3.3.1 EXTRACCIÓN Y ANÁLISIS DE LINEAMIENTOS DE INTERPRETACIÓN VISUAL

Así, la extracción de lineamientos de interpretación visual se realizó a partir del análisis y observación simultánea de dos materiales: *Imagen de Relieve Sombreado* (azimut de iluminación de 315°, 30° de altitud solar y 3 puntos de contraste) generada de un *Modelo Digital de Elevación* tipo *Red de Triángulos Irregulares* (TIN, por sus siglas en inglés), construido a partir del mapa

altimétrico vectorial escala 1:50,000 de INEGI (E15-D21, E15-D22, E15-D31, E15-D32); y *Ortofoto Digital* de INEGI obtenida vía WMS (Web Map Server), escala 1:20,000 (20k), B/N, con resolución de 3m. El trazado digital de lineamientos cubrió en su totalidad el área kárstica del PEST y zona de influencia¹¹⁰. En ciertos casos y obedeciendo al fracturamiento de gran escala, algunos de los lineamientos marcados se extienden más allá de los valles naturales atravesando collados bajos, siempre y cuando los valles adyacentes tienen aproximadamente la misma orientación. Se reconocieron un total de 1,405 lineamientos (**Mapa 10**) (**Mapa 11**).

Paso seguido a la obtención de lineamientos fue su análisis espacial con el propósito de identificar los distintos patrones de fracturamiento. Para ello fue necesario construir un Mapa de Densidad de Lineamientos (**Mapa 12**), el cual se realizó bajo el estándar de *densidad kernel*¹¹¹, expresado en cuatro clases seleccionadas por cortes naturales (*jenks*), con rangos de 0-591 (Baja), 591-1,913 (Media), 1,913-3,572 (Alta), y 3,572-7,173 (Muy Alta). La discriminación preliminar de los patrones de lineamientos se basó en el análisis visual del Mapa de Lineamientos de Interpretación Visual (**Mapa 10**), Mapa de Densidad de Lineamientos (**Mapa 12**), Mapa de Ubicación del Parque Estatal de la Sierra de Tabasco (**Mapa 1**), Mapa Geológico (**Mapa 2**), Mapa Fisiográfico-Topográfico (**Mapa 3**) y Mapa Hipsométrico (**Mapa 9**), principalmente. Se analizaron visualmente los patrones de orientación de los lineamientos, frecuencia, asociación y distribución espacial, así como su relación con la geología y topografía regional. Complementariamente se consultaron las diferentes propuestas de regionalización geomorfológica del PEST y áreas aledañas, tales como la de Gerstenhauer (1960) (**Figura 90**) e INEGI (2009) (**Mapa 3**), así como los patrones de lineamientos asociados a terrenos kársticos, descritos en el trabajo de Haryono & Day (2004) (**Figura 20**) (**Figura 51**) (**Figura 100**).

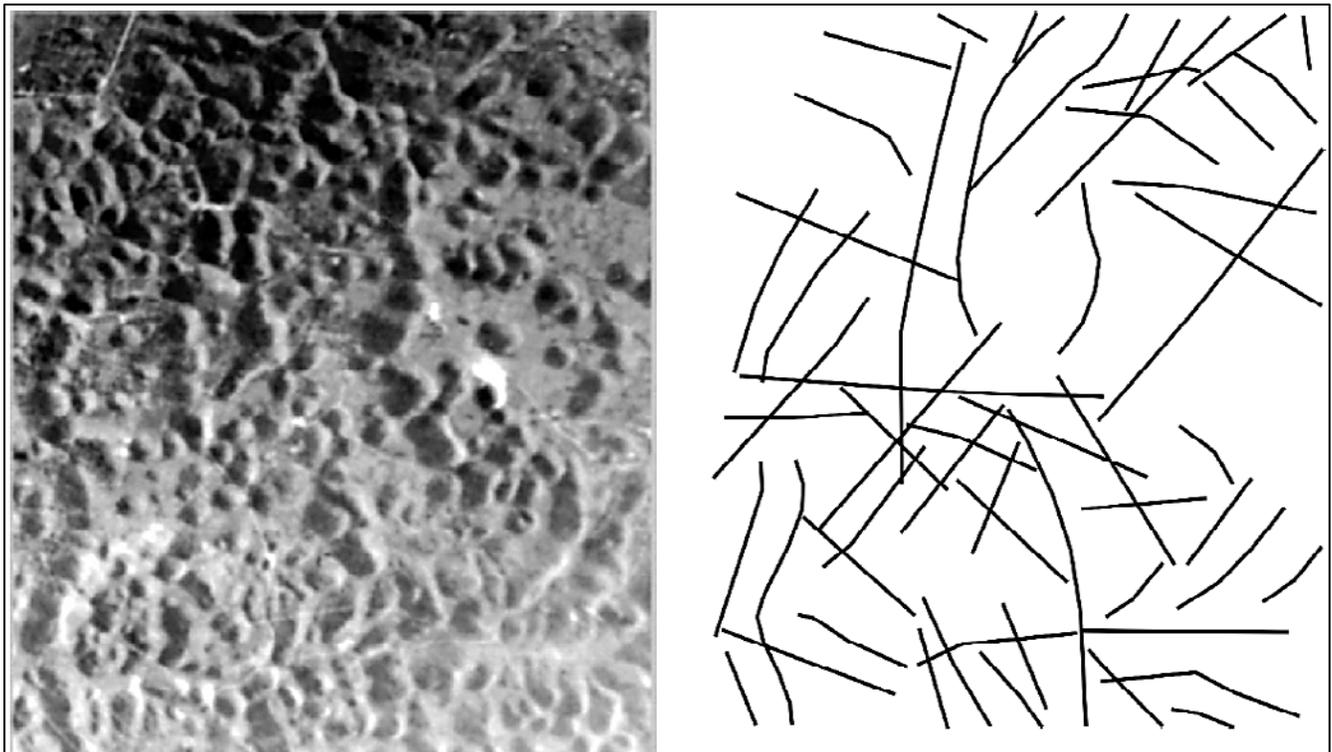
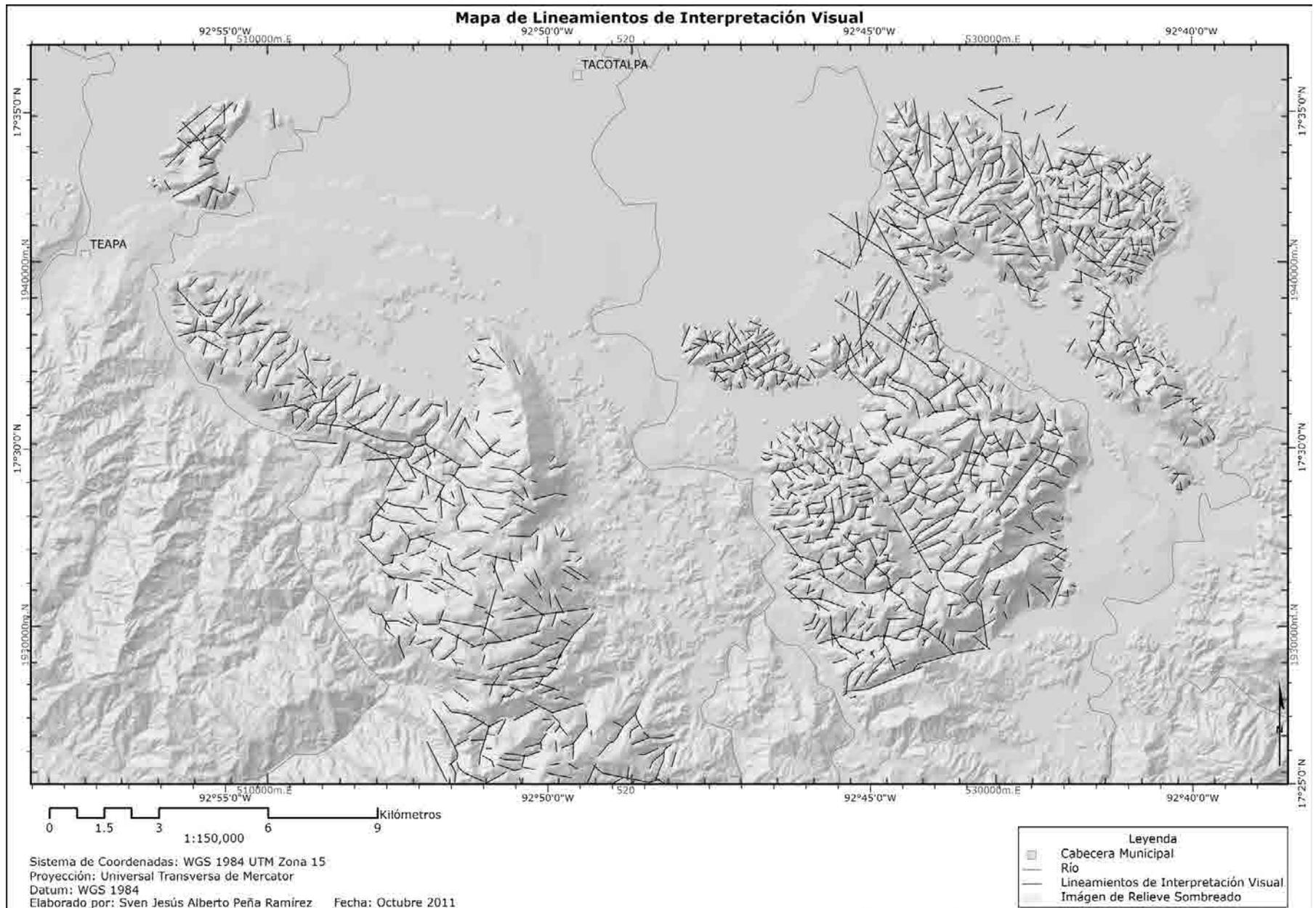


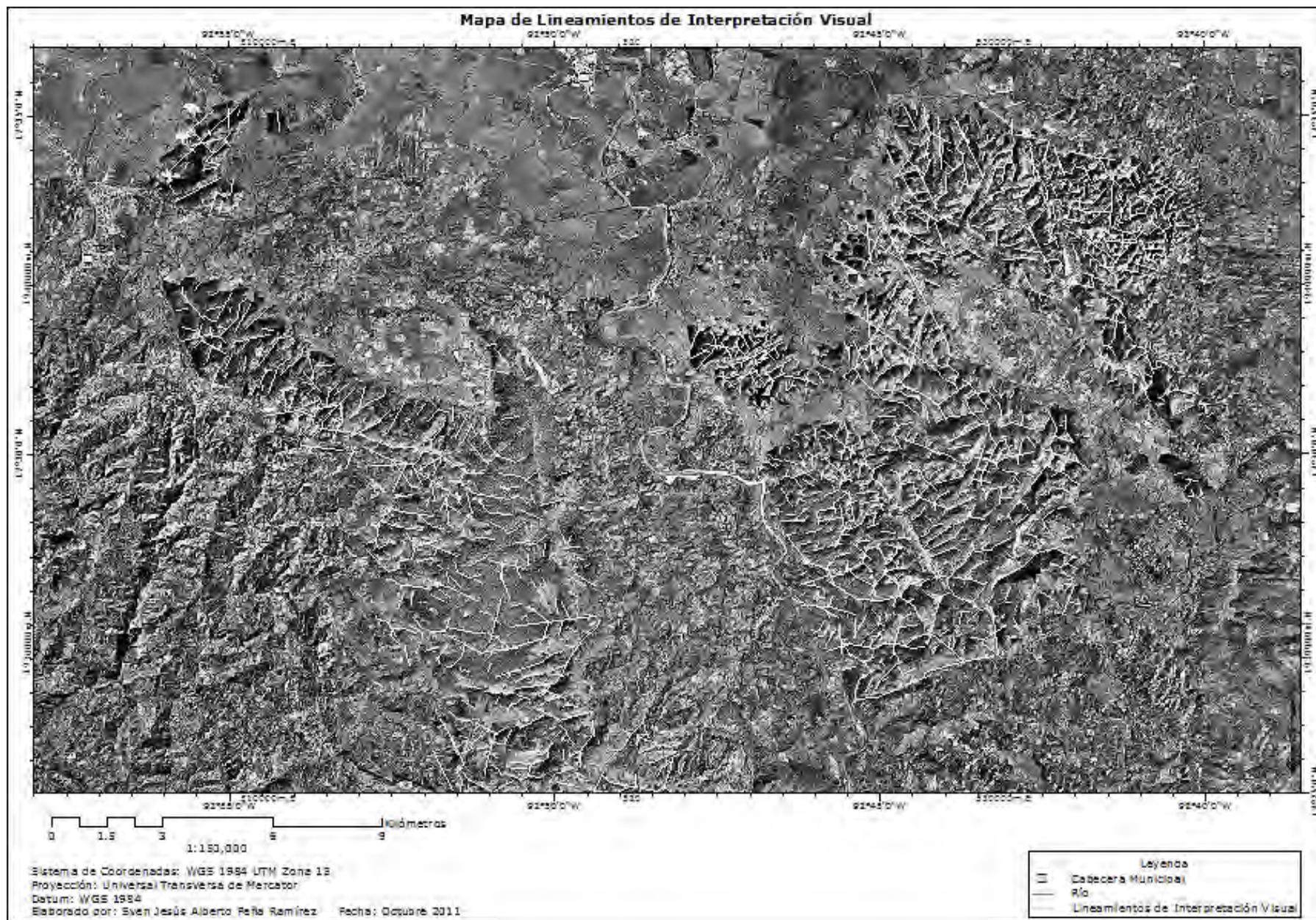
Figura 100. Fotografía aérea y lineamientos visibles del karst residual de Gunung Kidul, Indonesia
(Haryono, y otros, 2004)

¹¹⁰ Incluyendo áreas aisladas de karst residual y terrenos con una marcada influencia kárstica.

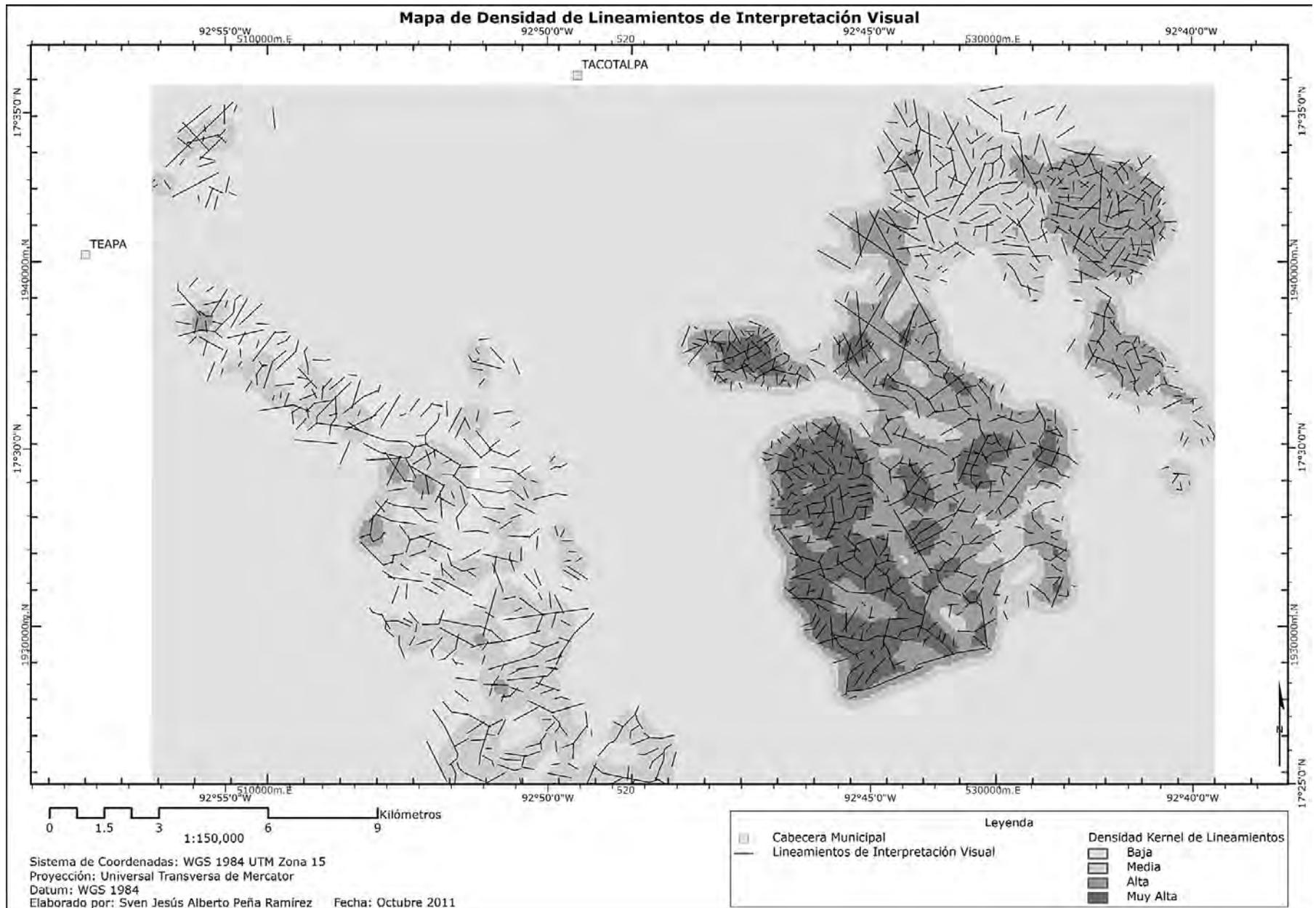
¹¹¹ Calcula una magnitud por unidad de área a partir de entidades de punto o polilínea mediante una función kernel para adaptar una superficie suavemente estrechada a cada punto o polilínea (ESRI, 2011). Ha de considerarse que la magnitud dada responde específicamente a la función kernel y no expresa el número de entidades por Km².



Mapa 10. Mapa de Lineamientos de Interpretación Visual con Imagen de Relieve Sombreado



Mapa 11. Mapa de Lineamientos de Interpretación Visual con Ortofoto Digital



Mapa 12. Mapa de Densidad de Lineamientos de Interpretación Visual

Se diferenciaron un total de 19 patrones de lineamientos en toda el área de estudio (**Mapa 13**)¹¹². Los polígonos resultantes fueron delimitados con base en los extremos de lineamientos, colinas kársticas residuales, elevaciones, parteaguas, límites litológicos, límites de densidad de lineamientos, fallas, cambios morfológicos en el relieve, zona de influencia significativa del karst, y fotointerpretación de afloramientos calizos. Por cuestiones de representatividad significativa, se consideró que los polígonos resultantes tuvieran, de preferencia, un área no menor a 1 Km². A su vez, los patrones de lineamientos resultantes fueron agrupados bajo el criterio de similitud, de manera que se reconocieron 4 tipos de patrón de lineamientos: Paralelos (1,2,9,13,14,15,18), Entrecruzados (3,4,7,12,16,19), Dendrítico (5,6,11,17) y Aislados (8,10) (**Mapa 14**).

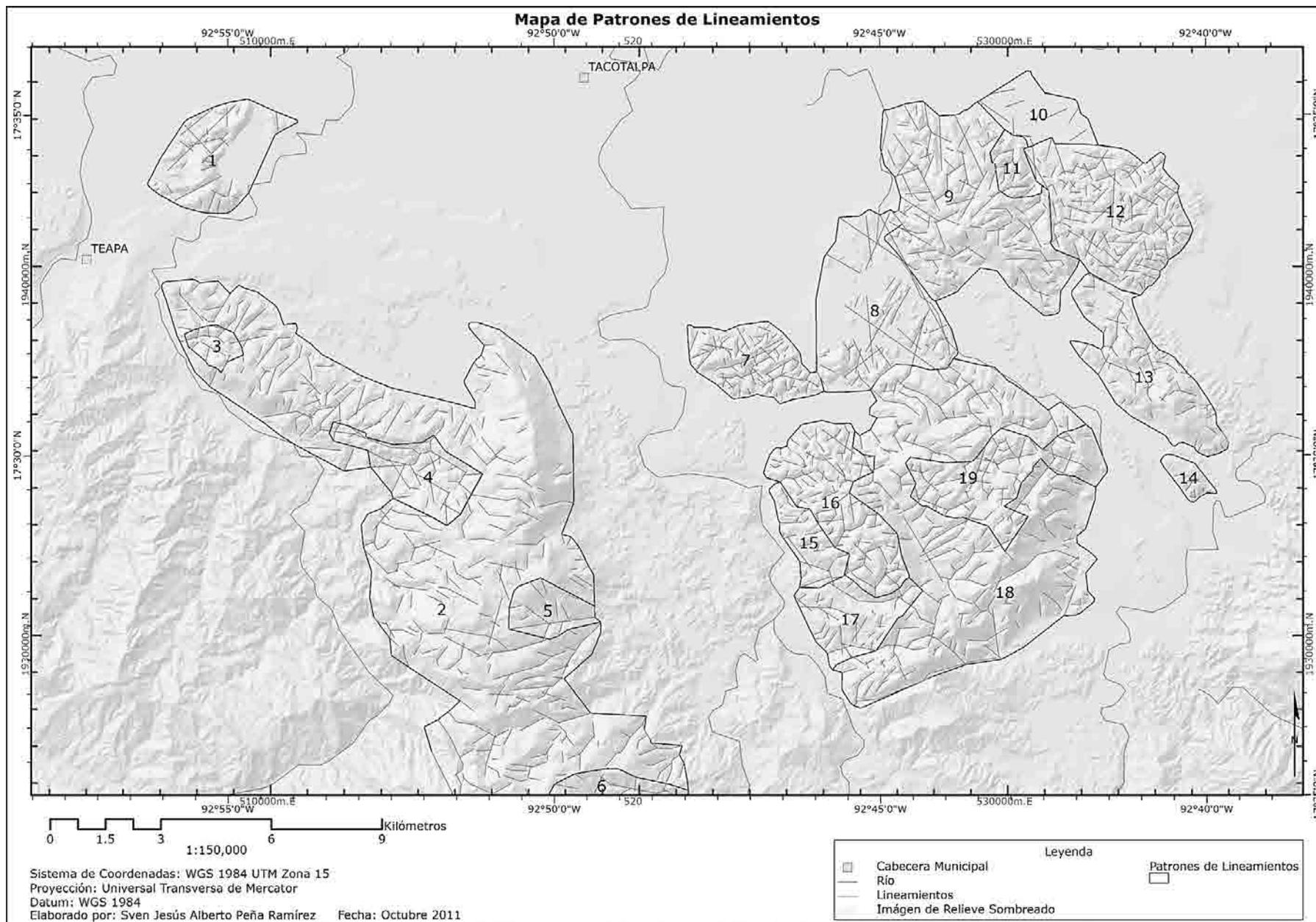
El siguiente paso consistió de un análisis estadístico de direcciones en función de la frecuencia y longitud de los lineamientos, esto a fin de corroborar y consolidar estadísticamente la discriminación espacial de los patrones de lineamientos. Este trabajo se realizó sobre la plataforma digital del software RockWorks 15 Complete, Revisión 2011.4.18. El análisis estadístico de cada patrón de lineamientos y de los tipos de patrón de lineamientos, requirió que el shapefile original fuera fragmentado para su estudio individual. De esta manera se crearon 19 shapefiles correspondientes a los 19 patrones de lineamientos, y 4 shapefiles correspondientes a los 4 tipos de patrón de lineamientos. La selección de trazos para cada polígono implicó lineamientos totales y/o parciales, no puntuales. A su vez, la incorporación de los shapefiles de ESRI a RockWorks 15, requirió la conversión de los mismos a archivos DXF_R2010. Los resultados se representaron mediante *Rosas de Direcciones* construidas a partir de puntos extremos, con intervalos de clase de 10°. Se elaboraron un total de 48 Rosas de Direcciones: 2 de toda el área de estudio, una de frecuencia de lineamientos y otra de longitud (**Figura 101**) (**Figura 102**); 38 correspondientes a la frecuencia y longitud de cada uno de los 19 patrones de lineamientos (**Figura 103**) (**Figura 104**) (**Figura 105**) (**Figura 106**) (**Figura 107**) (**Figura 108**); y 8 correspondientes a la frecuencia y longitud sumada de cada uno de los 4 tipos de patrones de lineamientos (**Figura 109**) (**Figura 110**) (**Figura 111**) (**Figura 112**) (**Figura 113**) (**Figura 114**) (**Figura 115**) (**Figura 116**). Los 1,405 lineamientos analizados suman una longitud total de 1,137.3 Km. Como puede observarse en la **Figura 101** la muestra total de lineamientos presenta una gran dispersión ($R\text{-mag}^{113}=0.09$), sin embargo, es evidente que la mayoría de las clases de mayor frecuencia (>80) sostienen una orientación preferente NE-SW. En el análisis de longitud (**Figura 102**) dicha preferencia de direcciones es menos evidente, las clases con valores mayores a 30 Km se distribuyen casi de manera regular desde los 20° y hasta los 140° de azimut (bidireccionalmente), con picos al NNE, E y SE.

Con el fin de escudriñar la relación existente entre la orientación de los lineamientos y su longitud, se aplicó un análisis estadístico de correlación, sobre la plataforma del software PASW Statistics 18. La hipótesis planteada al respecto suponía una correlación de curva, cuyos picos estarían soportados por clases con orientación preferente NW-SE y NE-SW, es decir, que la orientación de los lineamientos de mayor longitud obedecería al sistema de fracturamiento regional. La variable dependiente estuvo representada por la longitud de los lineamientos, mientras que la independiente por la orientación de los mismos. Debido a que la distribución de la muestra no pudo ser definida a priori, y a que la línea de ajuste¹¹⁴ de los datos no corresponde a una distribución conocida (**Figura 117**), se resolvió aplicar una prueba de correlación no paramétrica, específicamente el *coeficiente de correlación rho de Spearman* (Spiegel, 2009).

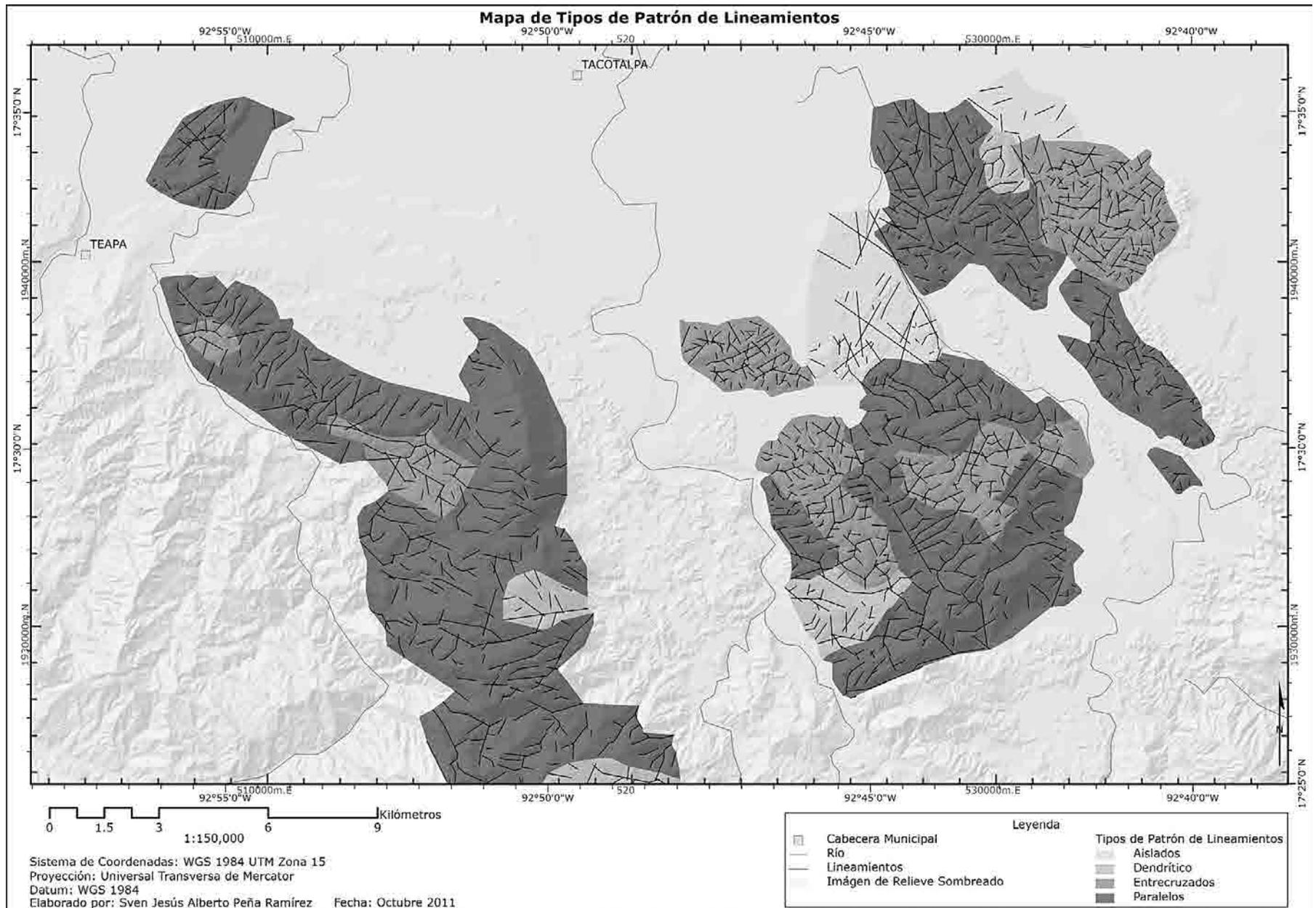
¹¹² El área comprendida por el patrón de lineamientos 6 quedó, por razones prácticas (disposición mayormente longitudinal del PEST), parcialmente mostrado en el área de cobertura del Mapa Base.

¹¹³ R-mag es la resultante estandarizada del vector medio en la muestra, cuyo rango oscila entre 0 y 1. Una muestra con gran dispersión tendrá una resultante pequeña.

¹¹⁴ La línea de ajuste de los datos se calculó con el método de regresión local o LOESS, por sus siglas en inglés, con 50% de puntos de ajuste y kernel de Epanechnikov, como valores por defecto. Dicho método no paramétrico, propuesto por Cleveland and Grosse (1991), fue diseñado para estimar las superficies de regresión local. Se aplica a casos donde la muestra presenta valores extremos o desordenados, los cuales requieren de un ajuste más robusto (Cohen, 2007). La regresión estadística o regresión a la media es la tendencia de una medición extrema a presentarse más cercana a la media en una segunda medición.



Mapa 13. Mapa de Patrones de Lineamientos



Mapa 14. Mapa de Tipos de Patrón de Lineamientos

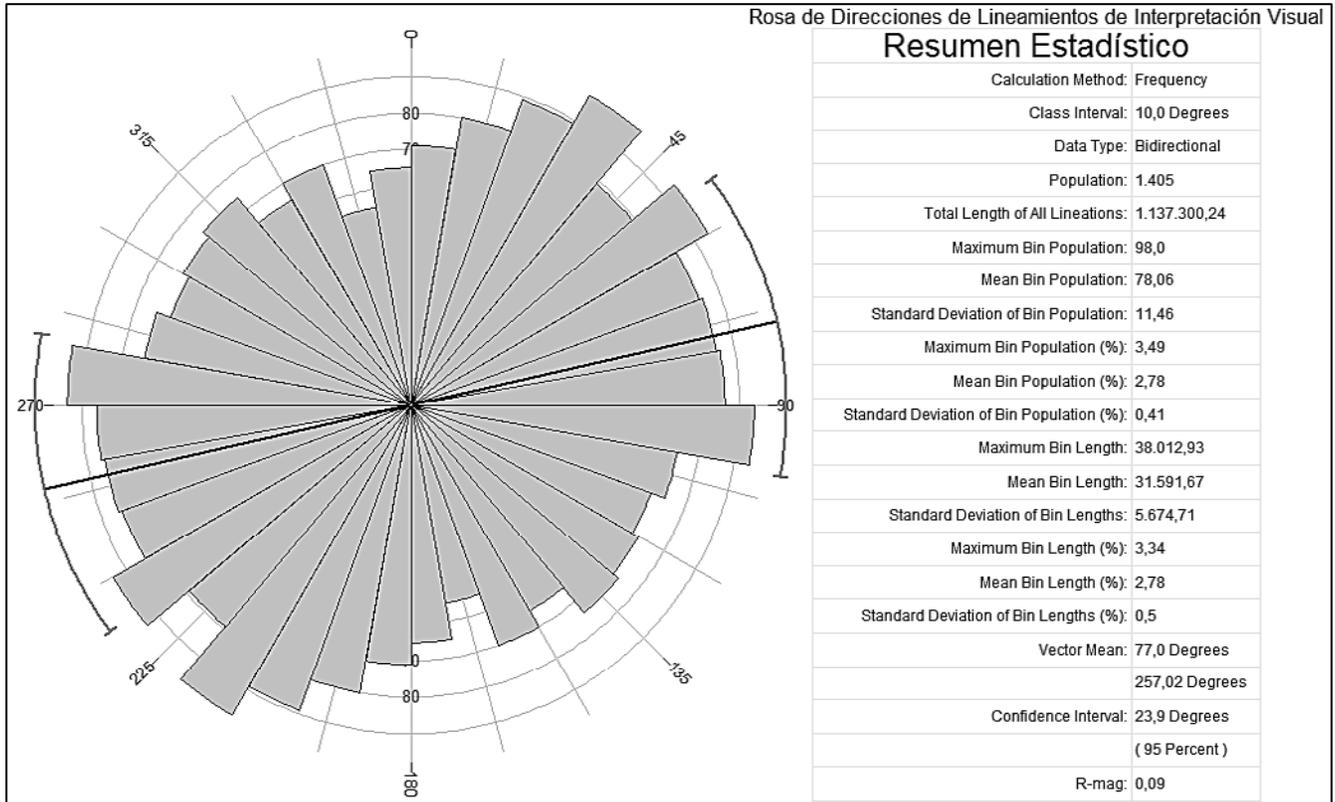


Figura 101. Rosa de Direcciones de Lineamientos de Interpretación Visual (Frecuencia)

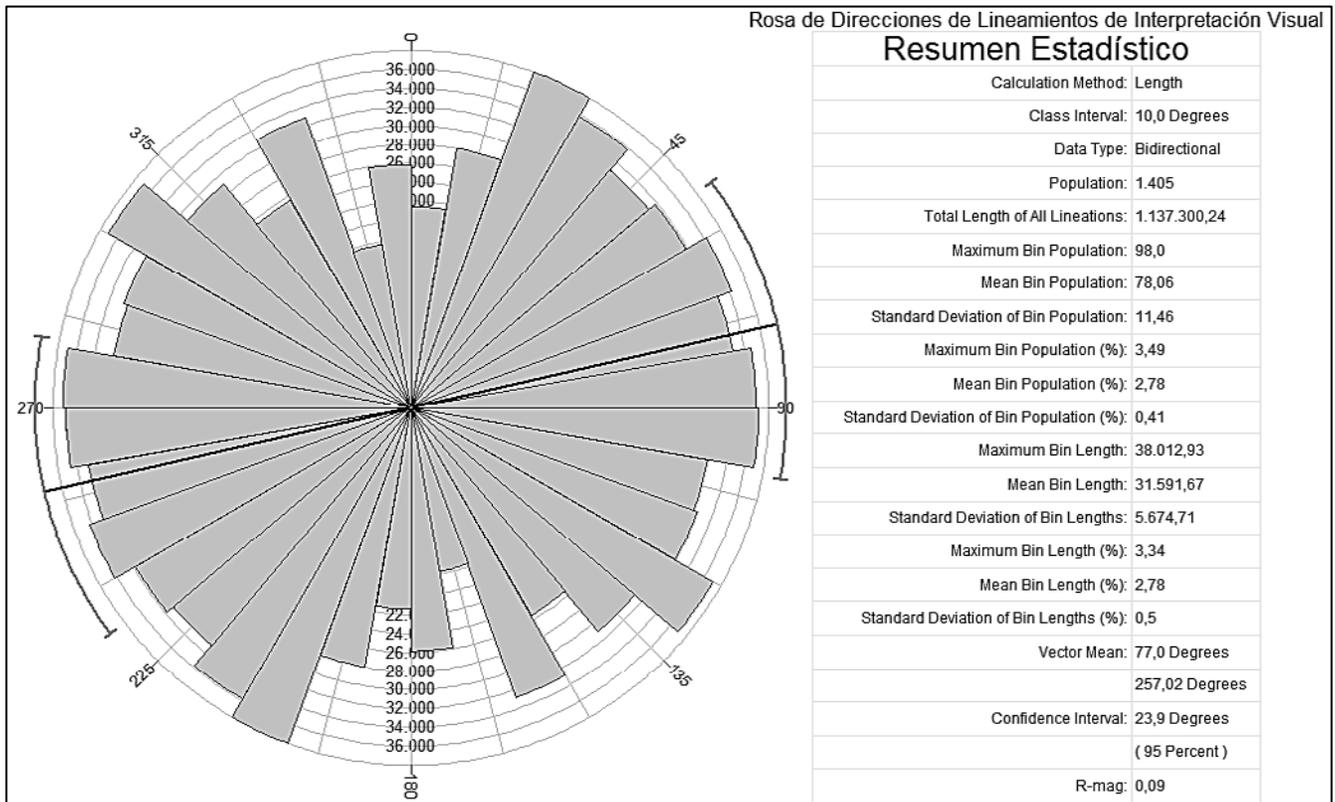


Figura 102. Rosa de Direcciones de Lineamientos de Interpretación Visual (Longitud)

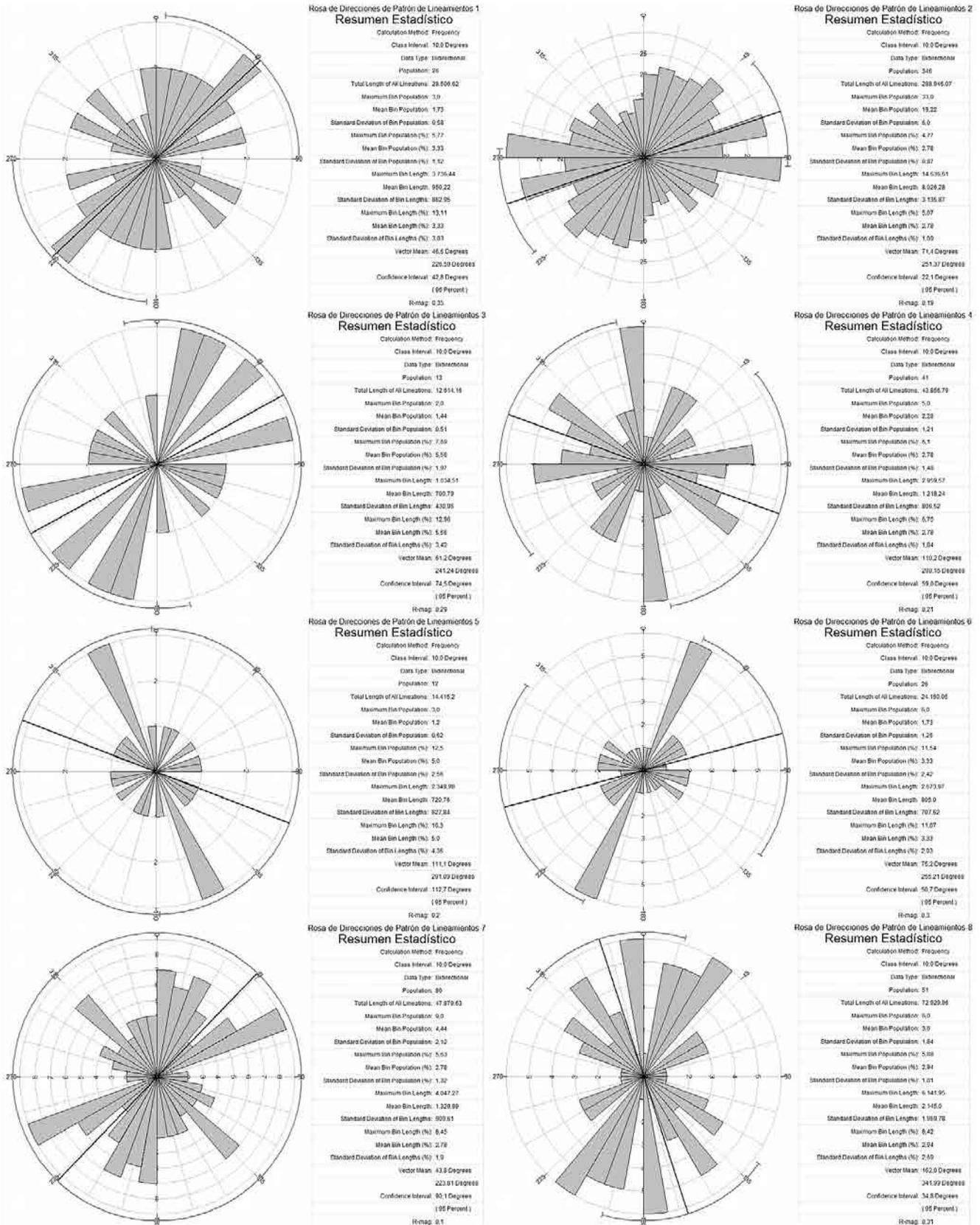


Figura 103. Rosas de Direcciones de Patrón de Lineamientos 1 al 8 (Frecuencia)

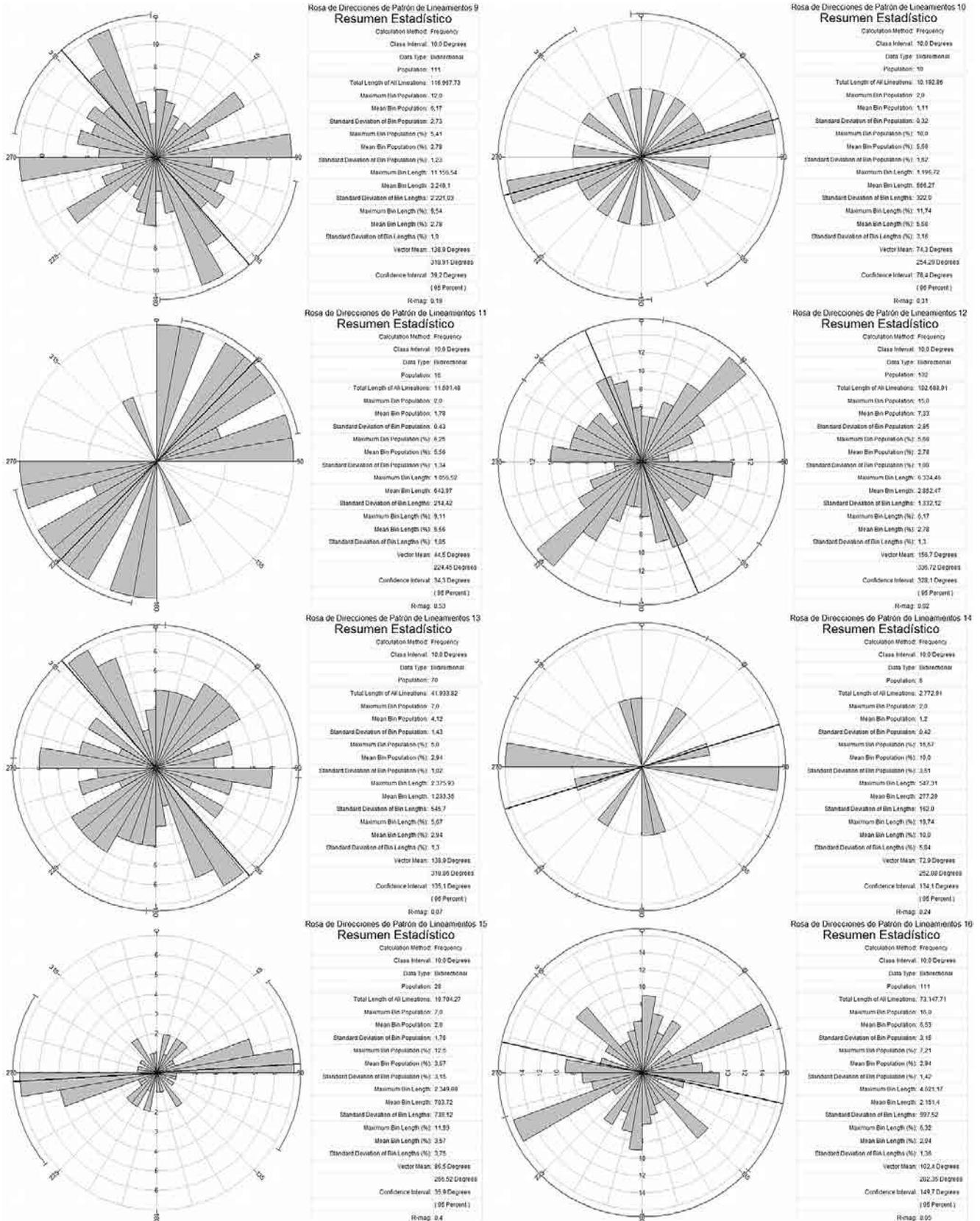


Figura 104. Rosas de Direcciones de Patrón de Lineamientos 9 al 16 (Frecuencia)

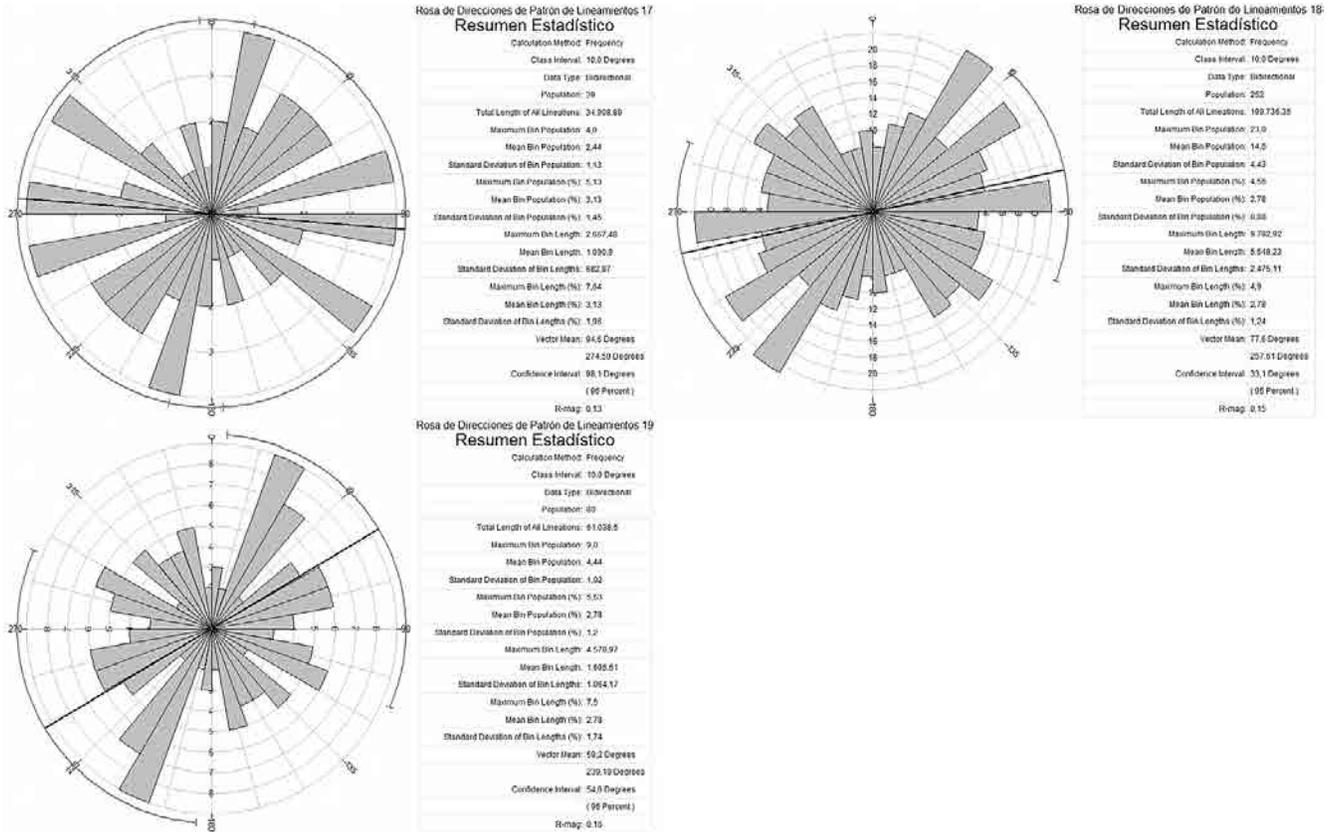


Figura 105. Rosas de Direcciones de Patrón de Lineamientos 17 al 19 (Frecuencia)

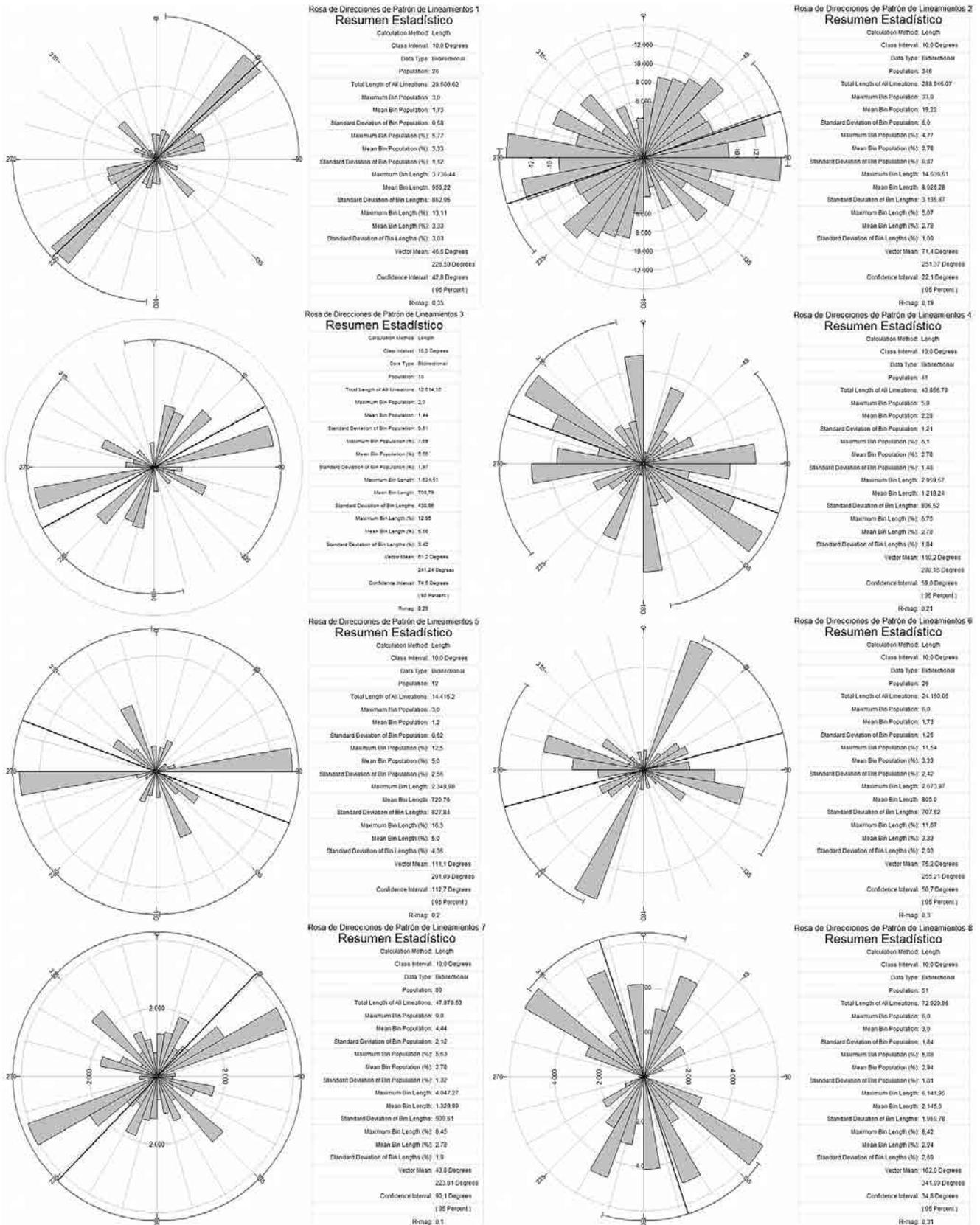


Figura 106. Rosas de Direcciones de Patrón de Lineamientos 1 al 8 (Longitud)

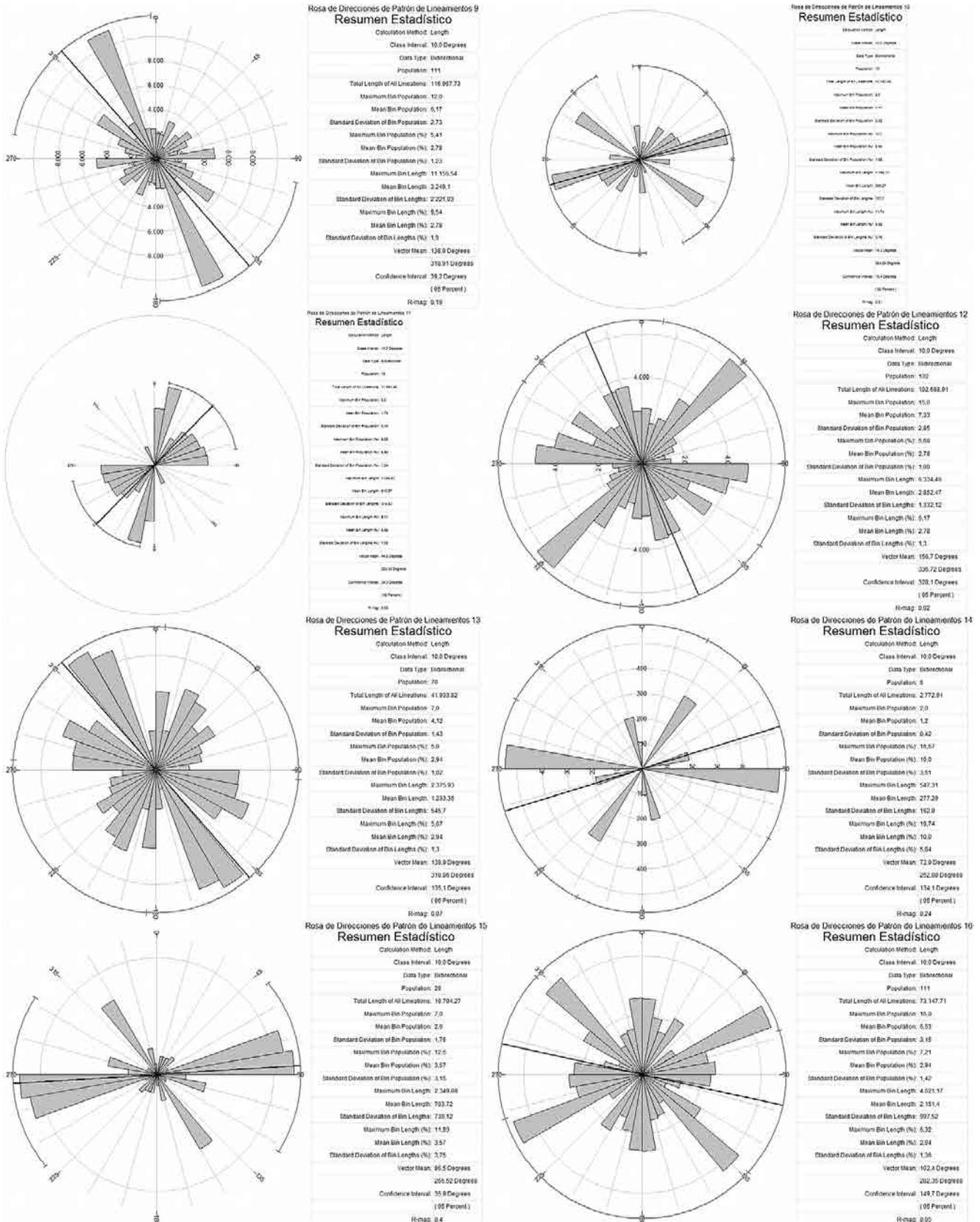


Figura 107. Rosas de Direcciones de Patrón de Lineamientos 9 al 16 (Longitud)

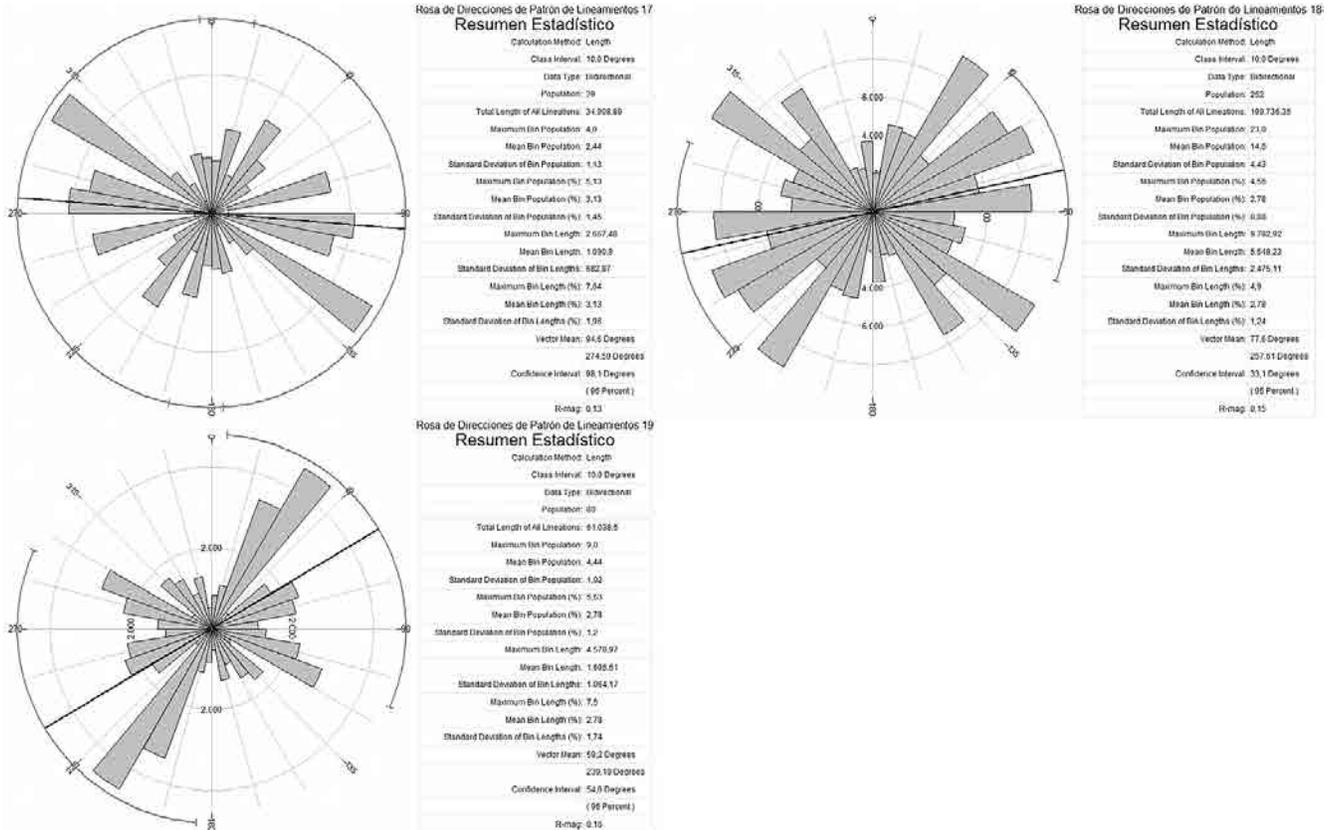


Figura 108. Rosas de Direcciones de Patrón de Lineamientos 17 al 19 (Longitud)

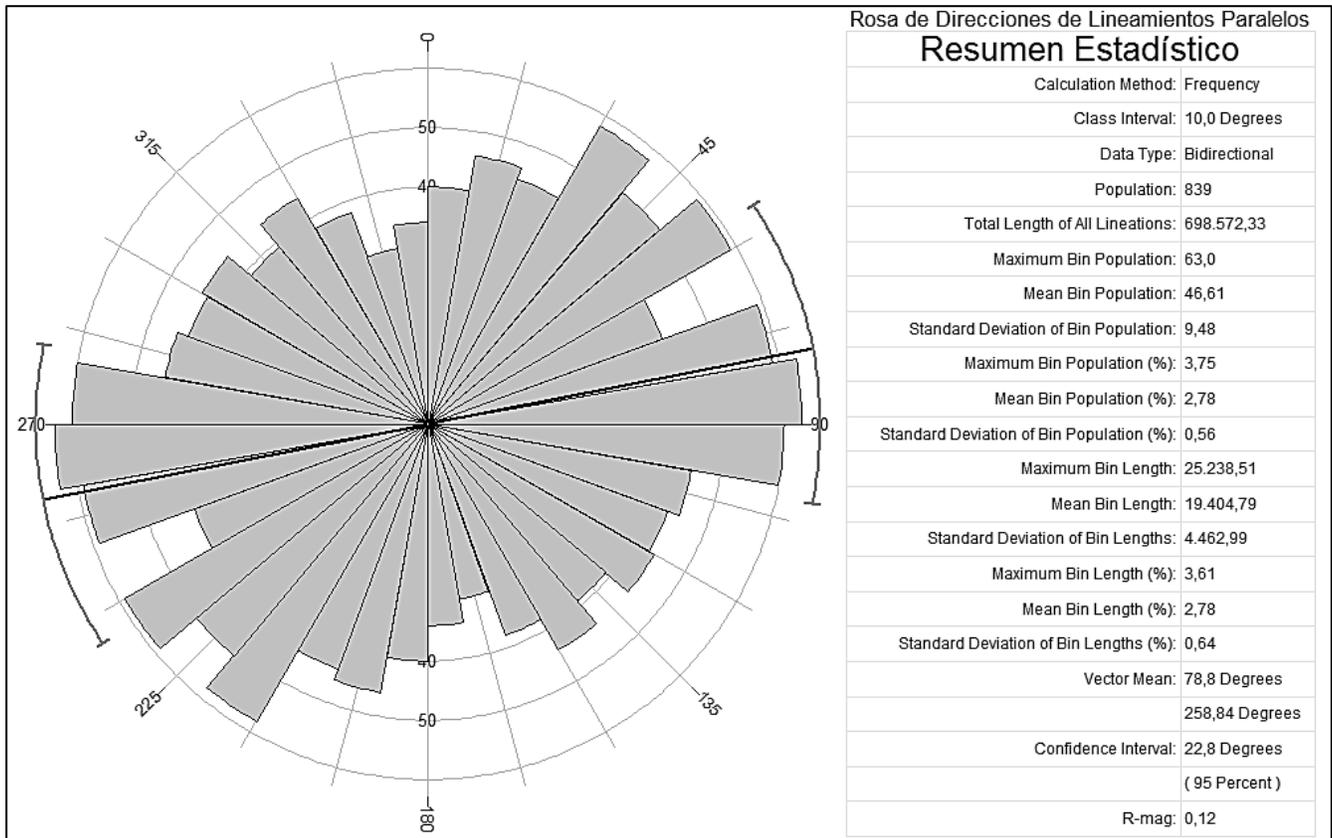


Figura 109. Rosa de Direcciones de Lineamientos Paralelos (Frecuencia)

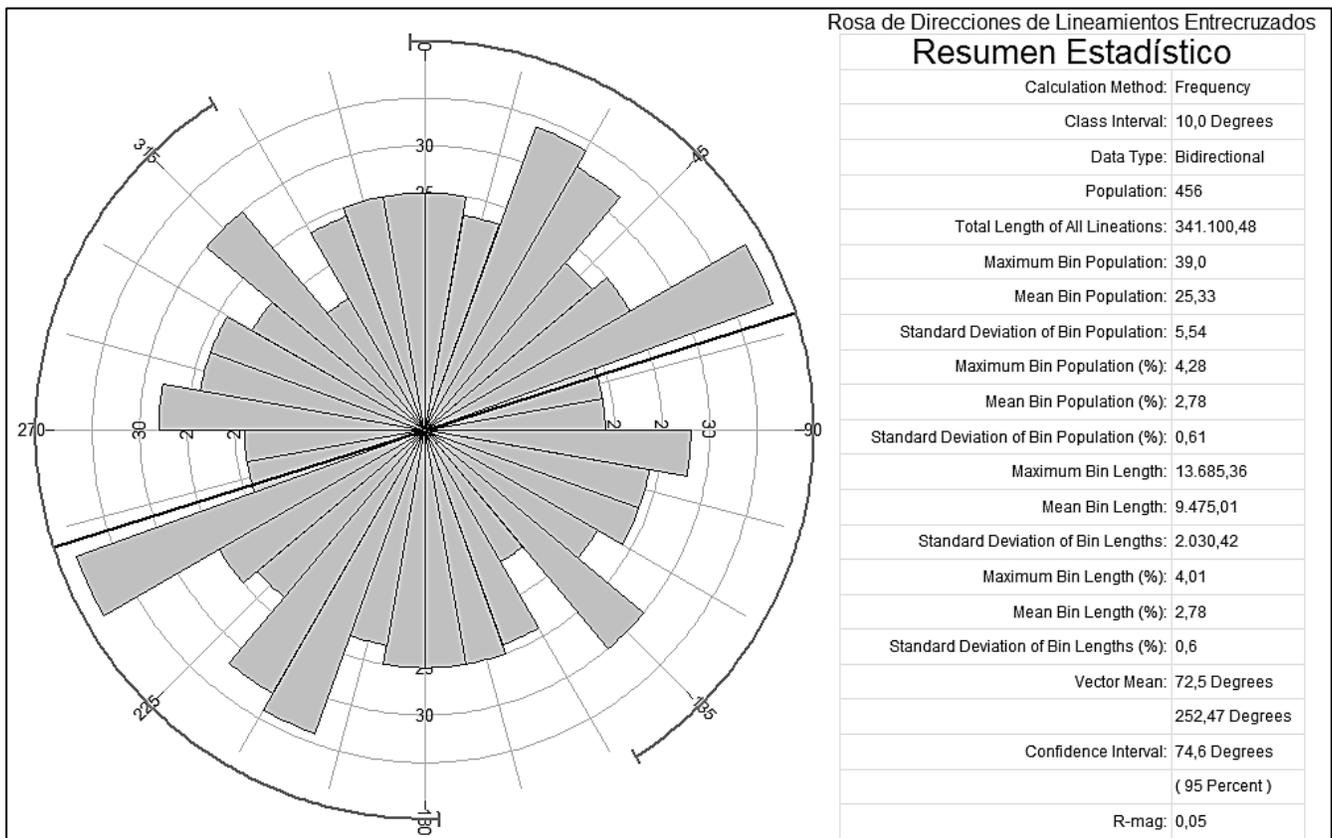


Figura 110. Rosa de Direcciones de Lineamientos Entrecruzados (Frecuencia)

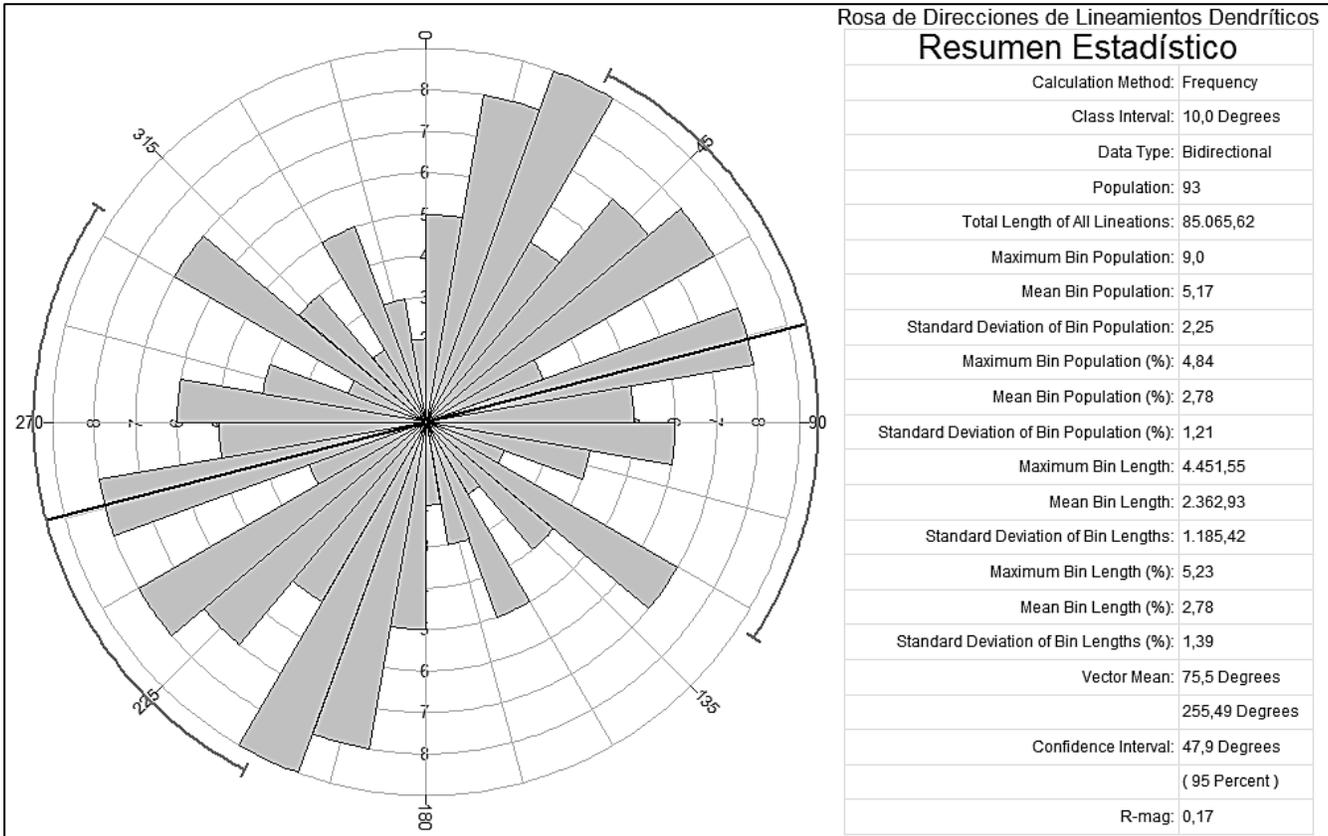


Figura 111. Rosa de Direcciones de Lineamientos Dendríticos (Frecuencia)

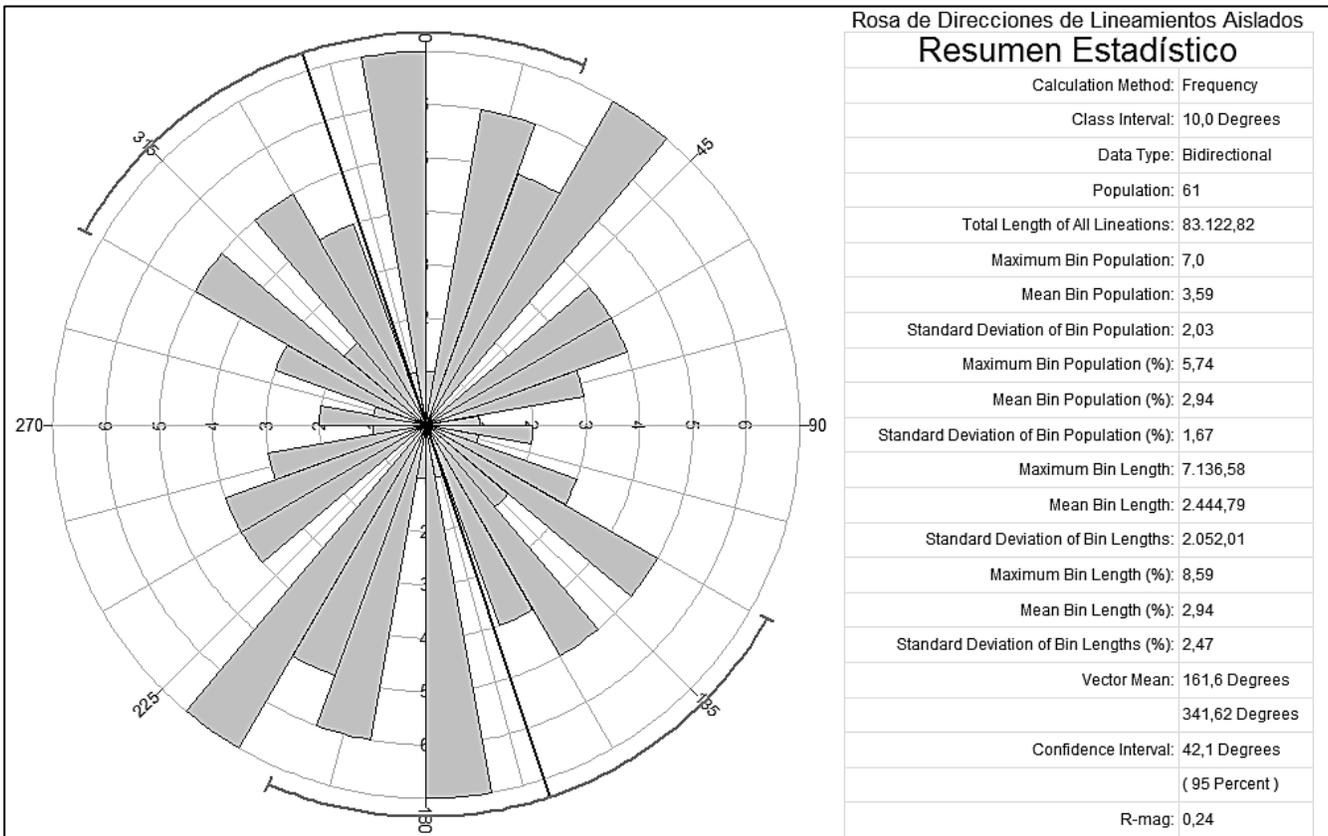


Figura 112. Rosa de Direcciones de Lineamientos Aislados (Frecuencia)

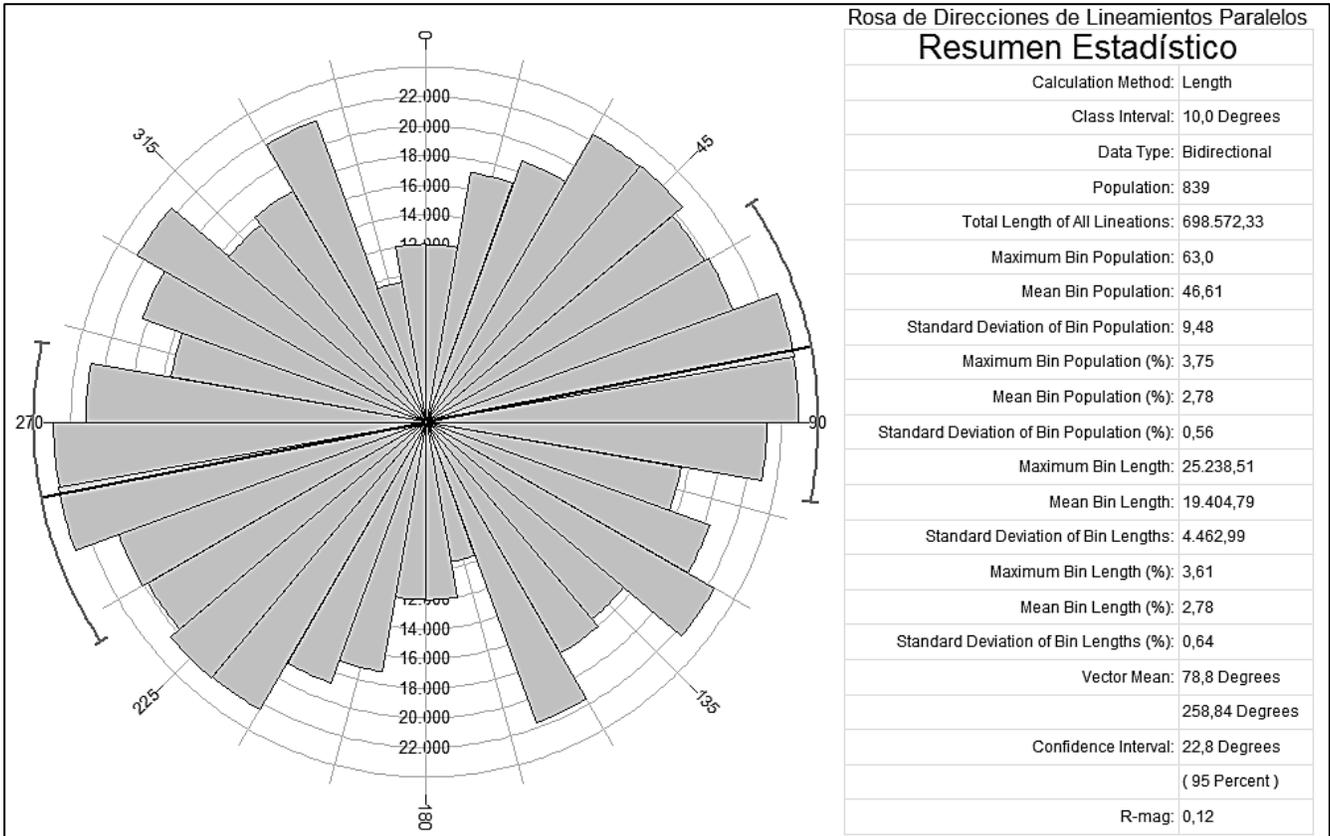


Figura 113. Rosa de Direcciones de Lineamientos Paralelos (Longitud)

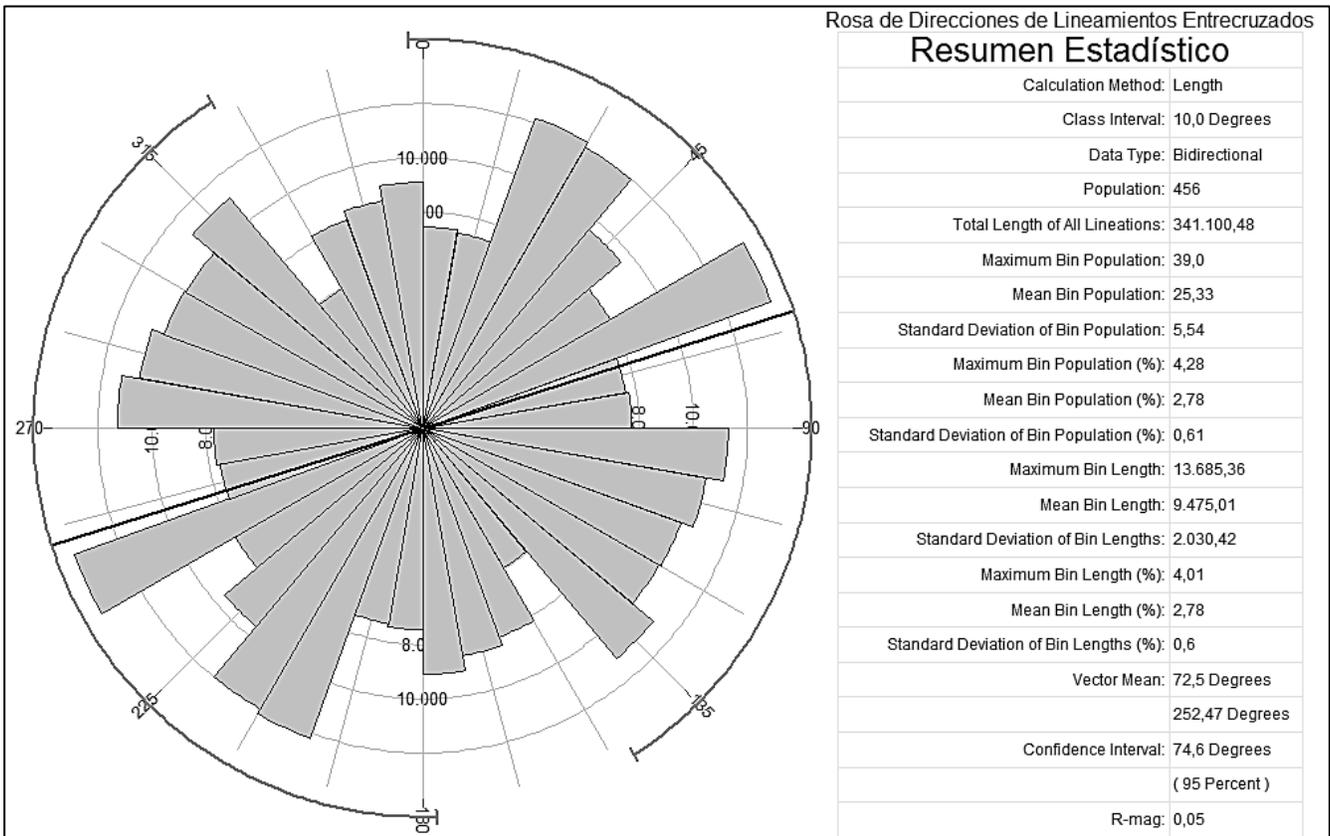


Figura 114. Rosa de Direcciones de Lineamientos Entrecruzados (Longitud)

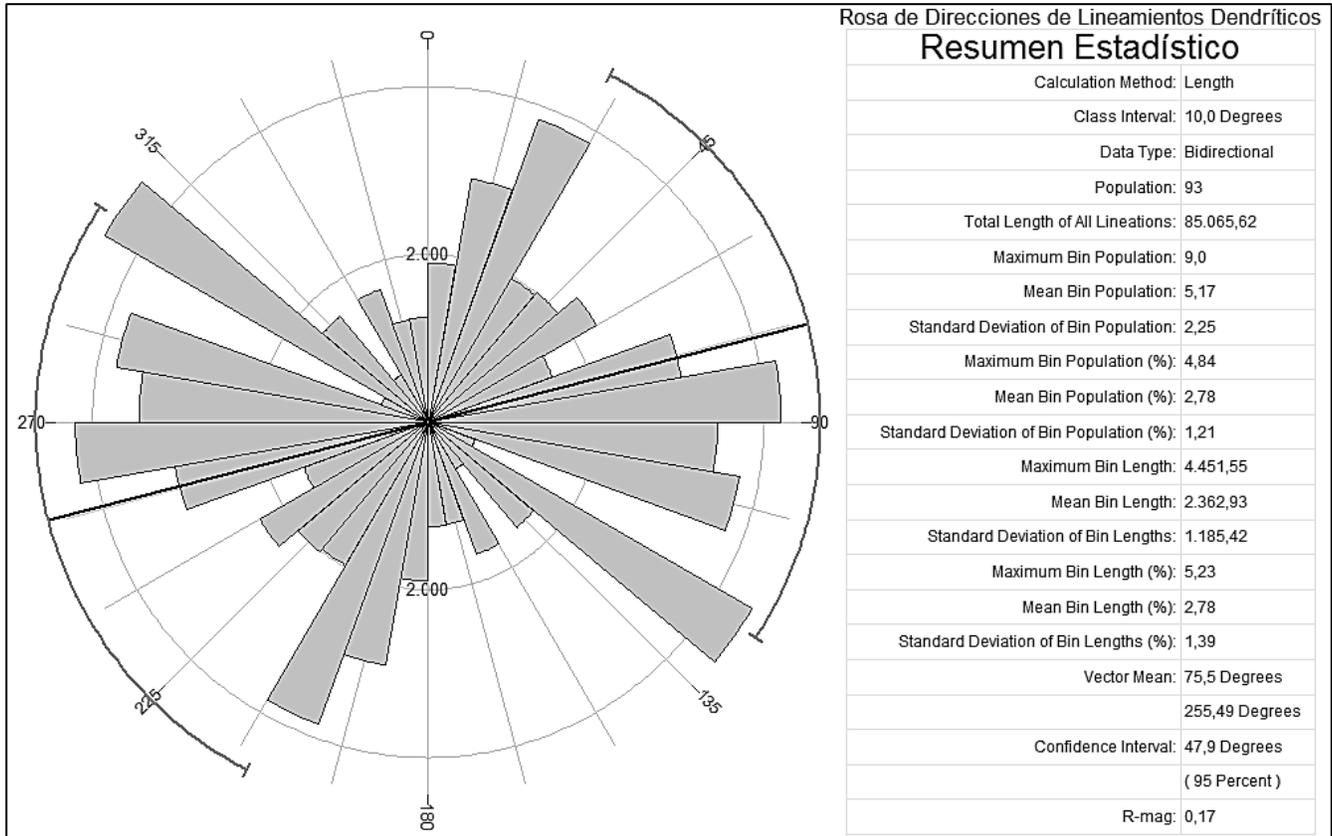


Figura 115. Rosa de Direcciones de Lineamientos Dendríticos (Longitud)

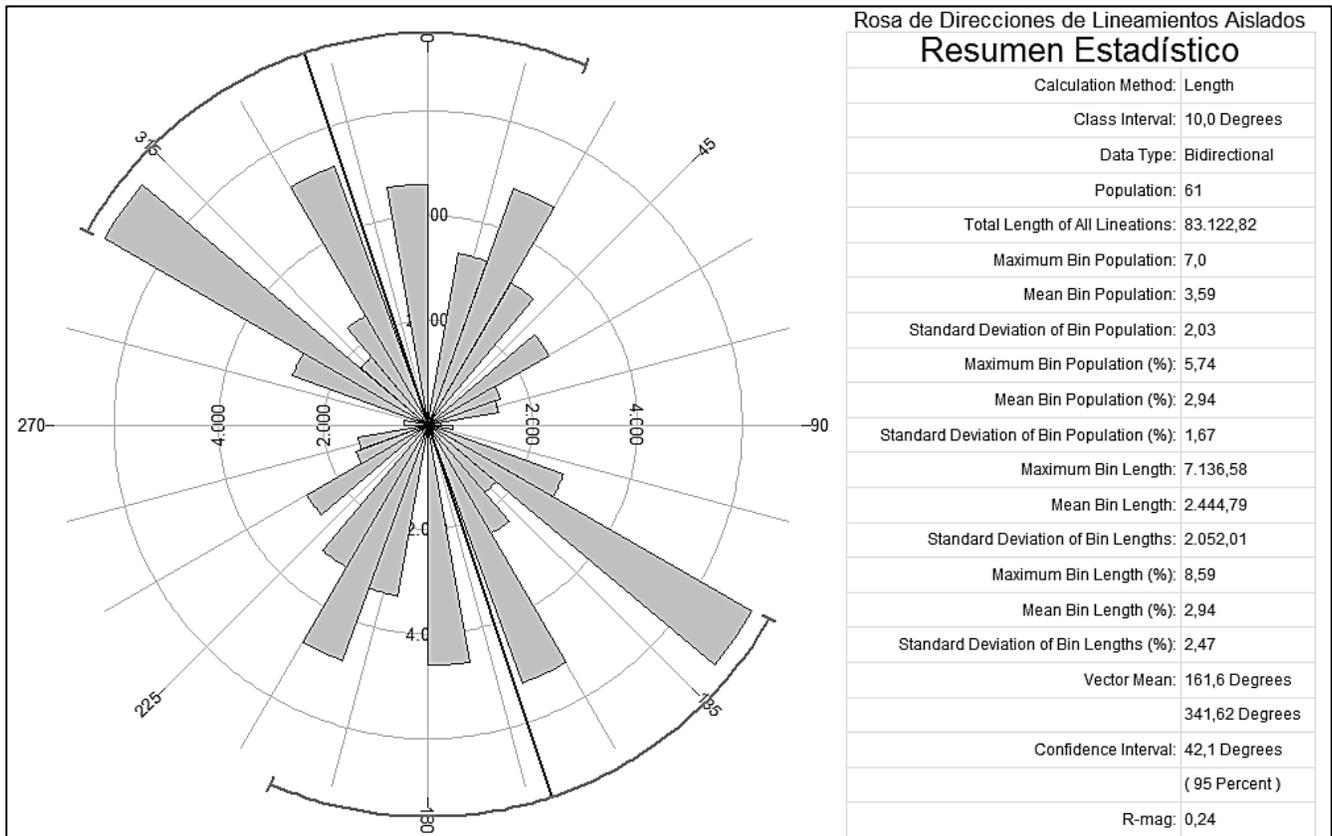


Figura 116. Rosa de Direcciones de Lineamientos Aislados (Longitud)

La prueba de significación para el trabajo estadístico fue de tipo bilateral, con un nivel de significancia del 5%=0.05. Así, el valor de "Rho" calculado fue de 0.018, con una P o significancia bilateral de 0.491, y N=1405 (**Tabla 21**). A razón de que el error calculado para la prueba (0.491) superó por mucho el nivel de significancia establecido (0.05), se resolvió rechazar la hipótesis de correlación propuesta. Sumando a ello la interpretación del valor de "Rho" (0.018) en la **Tabla 22**, se concluye que aunque existe una muy baja correlación ésta no es significativa, por tanto, no existe correlación perceptible entre la orientación de los lineamientos y su longitud. Esta conclusión corresponde con la baja correlación gráfica, exhibida en los diferentes pares de rosas de direcciones (frecuencia y longitud).

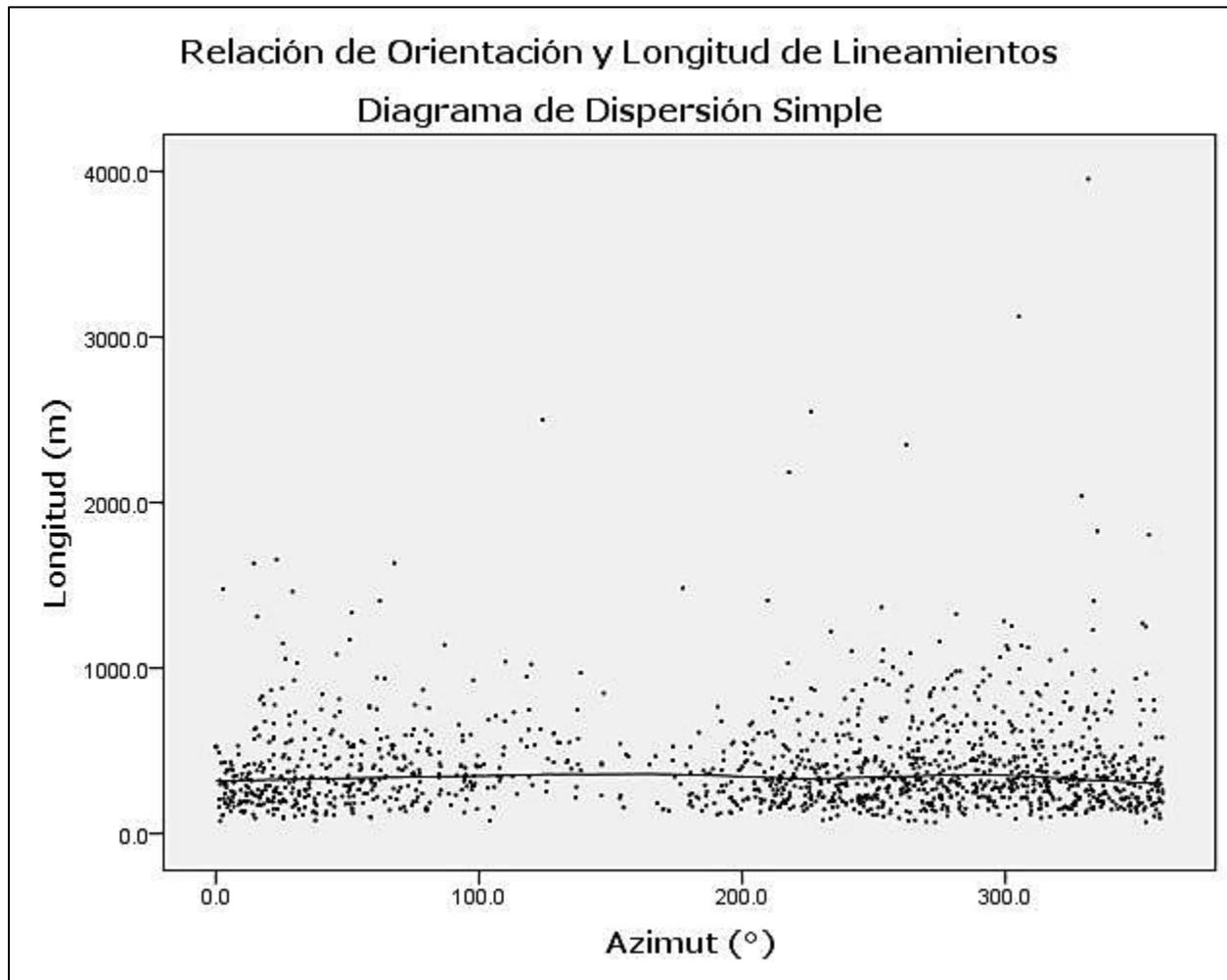


Figura 117. Relación de Orientación y Longitud de Lineamientos

Tabla 21. Coeficiente de Correlación de Spearman para las variables Orientación y Longitud de Lineamientos

| Correlaciones | | | | |
|-----------------|--------------|----------------------------|-------|--------------|
| | | Azimut (°) | | Longitud (m) |
| Rho de Spearman | Azimut (°) | Coeficiente de correlación | 1.000 | .018 |
| | | Sig. (bilateral) | . | .491 |
| | | N | 1405 | 1405 |
| | Longitud (m) | Coeficiente de correlación | .018 | 1.000 |
| | | Sig. (bilateral) | .491 | . |
| | | N | 1405 | 1405 |

Tabla 22. Interpretación del valor de "Rho"
 Reproducido de (Sociedad Peruana de Bioestadística e Investigación en Salud, 2009)

| Rango | Tipo de Correlación |
|----------------|---------------------|
| de 0.00 a 0.19 | Muy baja |
| de 0.20 a 0.39 | Baja |
| de 0.40 a 0.59 | Moderada |
| de 0.60 a 0.79 | Buena |
| de 0.80 a 1.00 | Muy Buena |

La agrupación de los patrones de lineamientos se corroboró y consolidó cuantitativa y espacialmente a partir de 4 tratamientos:

1. Análisis de frecuencia de lineamientos a partir de clases.
2. Cálculo y comparación de densidad de lineamientos por patrón y tipo de patrón.
3. Análisis del tipo de drenaje.
4. Análisis de la dispersión estadística por tipo de patrón.

El análisis de frecuencia de lineamientos consistió básicamente en comprobar si las clases más destacadas en cada tipo de patrón de lineamientos, coinciden con las expuestas en sus patrones formativos. La **Tabla 23** muestra las clases más destacadas por tipo de patrón. El criterio de selección consistió en considerar solo a aquellas cuya frecuencia alcanzara un valor igual o mayor a 1 rango (en el eje de frecuencia de la rosa de direcciones) por debajo del rango hospedero del valor máximo. En la **Tabla 24** se describen las coincidencias correspondientes.

Tabla 23. Orientaciones preferidas por tipo de patrón de lineamientos

| Tipo de Patrón de Lineamientos | Conforme a criterio de selección | Rangos seleccionados (Az) | Rangos seleccionados agrupados (Az) | Orientación |
|--------------------------------|----------------------------------|--|-------------------------------------|------------------|
| Paralelos | >50 | 31-40, 41-50, 51-60, 71-80, 81-90, 91-100 (6) | 31-60, 71-100 | NE, NEE-SEE |
| Entrecruzados | >30 | 21-30, 31-40, 61-70, 131-140 (4) | 21-40, 61-70, 131-140 | NNE-NE, NEE, SE |
| Dendrítico | >7 | 11-20, 21-30, 41-50, 51-60, 71-80, 121-130 (6) | 11-30, 41-60, 71-80, 121-130 | NNE, NE, NEE, SE |
| Aislados | >5 | 11-20, 21-30, 31-40, 121-130, 141-150, 171-180 (6) | 11-40, 121-130, 141-150, 171-180 | NNE-NE, SE, SSE |

Tabla 24. Coincidencias de orientaciones preferidas entre tipos de patrón de lineamientos y patrones formativos

| Tipo de Patrón de Lineamientos | Coincide >50% | No Coincide >50% | Proporción de coincidencia | Notas |
|--------------------------------|--------------------|------------------|----------------------------|--|
| Paralelos | 1,2,9,13, 14,15,18 | - | 7/7 | 9 y 13 presentan frecuencias relativamente altas en las clases 141-150 y 151-160 |
| Entrecruzados | 7,16,19 | 3,4,12 | 3/6 | |
| Dendrítico | 6,11,17 | 5 | 3/4 | |
| Aislados | 8 | 10 | 1/2 | |

Es evidente la alta correspondencia de frecuencias que presentan los tipos de patrón 1 y 3, i.e. paralelos y dendrítico (**Tabla 24**). Siendo el grupo de los patrones paralelos, el más sensible al criterio de frecuencia (**Tabla 24**).

Como segunda instancia se calculó la densidad de lineamientos por patrón, dividiendo el número de lineamientos considerados por polígono, entre el área correspondiente en Km² (**Tabla 25**) (**Figura 118**). La **Tabla 26** enlista la densidad de lineamientos por tipo de patrón.

Tabla 25. Densidad de lineamientos por patrón

| Patrón de Lineamientos | Lineamientos por patrón | Área (Km ²) | Densidad de lineamientos |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 1 | 26 | 7.42277644868 | 3.50 |
| 2 | 348 | 68.51816936940 | 5.08 |
| 3 | 13 | 1.22871015975 | 10.58 |
| 4 | 41 | 4.97531635418 | 8.24 |
| 5 | 12 | 2.67499766010 | 4.48 |
| 6 | 26 | 4.27934903346 | 6.07 |
| 7 | 80 | 5.54898488385 | 14.42 |
| 8 | 51 | 12.53325574640 | 4.07 |
| 9 | 111 | 18.22455132600 | 6.09 |
| 10 | 10 | 3.65934856975 | 2.73 |
| 11 | 16 | 1.62243086234 | 9.86 |
| 12 | 132 | 12.34690420180 | 10.69 |
| 13 | 70 | 8.87098545675 | 7.89 |
| 14 | 6 | 0.96962250616 | 6.19 |
| 15 | 28 | 2.76849059925 | 10.11 |
| 16 | 111 | 8.67876423262 | 12.79 |
| 17 | 39 | 4.71389753706 | 8.27 |
| 18 | 252 | 35.77902452850 | 7.04 |
| 19 | 80 | 7.94490693292 | 10.07 |

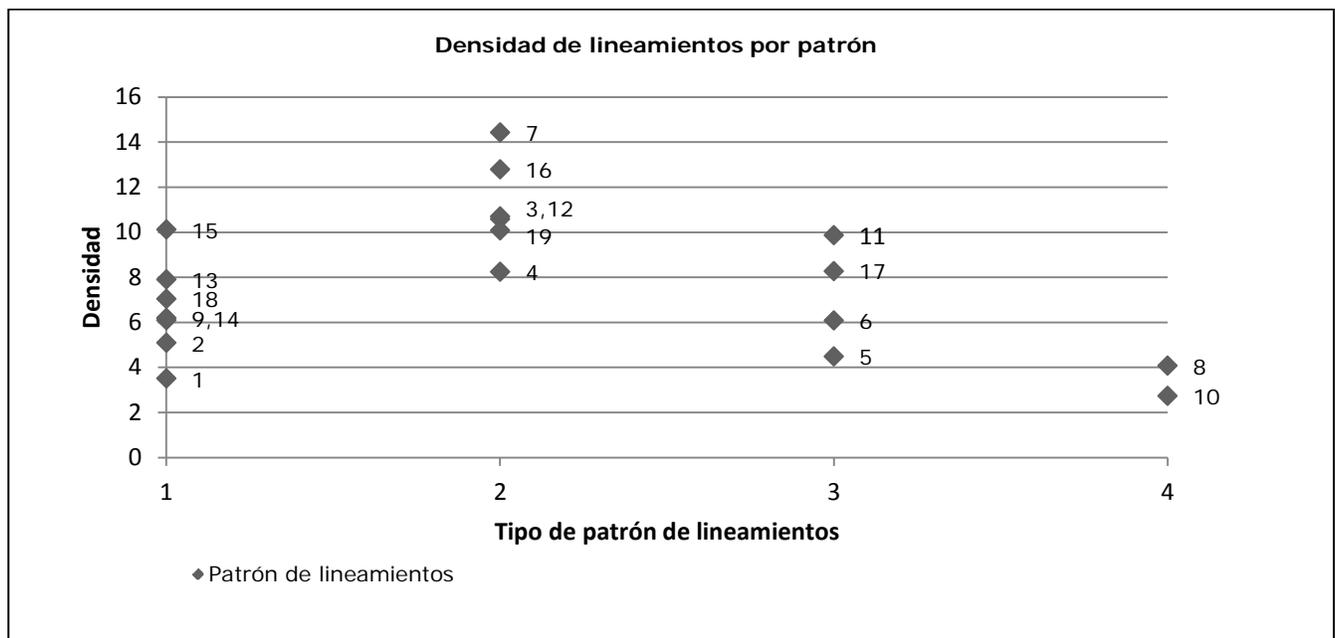


Figura 118. Gráfica de densidad de lineamientos por patrón
 1) Paralelos, 2) Entrecruzados, 3) Dendrítico, 4) Aislados

Tabla 26. Densidad de lineamientos por tipo de patrón

| Tipo de Patrón de Lineamientos | Lineamientos por patrón | Área (Km ²) | Densidad de lineamientos |
|--------------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Paralelos | 841 | 142.55362023474 | 5.90 |
| Entrecruzados | 457 | 40.72358676512 | 11.22 |
| Dendrítico | 93 | 13.29067509296 | 7.00 |
| Aislados | 61 | 16.19260431615 | 3.76 |

Los resultados ponen en evidencia la superioridad, en términos de densidad de lineamientos, de la mayoría de los patrones entrecruzados, seguidos en su conjunto por los dendríticos,

paralelos, y finalmente los aislados (**Tabla 25**) (**Figura 118**). Esto es corroborado por los valores de densidad correspondientes a los tipos de patrón de lineamientos (**Tabla 26**).

El siguiente tratamiento consistió en el análisis gráfico (por segunda ocasión) de los tipos de drenaje presentes en cada uno de los patrones de lineamientos (**Mapa 13**). Se realizó una comparación visual de los patrones de lineamientos con los diferentes tipos de drenaje conocidos, especialmente en áreas kársticas (**Figura 20**) (**Figura 51**) (**Figura 100**). Este tratamiento deja en claro que la similitud intergrupala de los tipos de patrón de lineamientos es gráficamente significativa (**Mapa 13**).

Como último paso se evaluó la *dispersión*¹¹⁵ estadística por tipo de patrón (agrupada) (**Tabla 27**). Destaca la alta dispersión que presenta el grupo de los patrones entrecruzados (R-mag=0.05), seguida por la de los paralelos (R-mag=0.12), dendríticos (R-mag=0.17), y aislados con la dispersión más baja (R-mag=0.24).

Tabla 27. Dispersión por tipo de patrón de lineamientos

| Tipo de Patrón de Lineamientos | Dispersión |
|--------------------------------|------------|
| Paralelos | 0.12 |
| Entrecruzados | 0.05 |
| Dendrítico | 0.17 |
| Aislados | 0.24 |

La interpretación cuantitativa de los resultados permitió exponer la sensibilidad¹¹⁶ de cada tipo de patrón a un tratamiento dado. Destacando el grupo de los paralelos y dendríticos bajo el criterio de frecuencia, el de los entrecruzados y aislados bajo el criterio de densidad, todos los grupos bajo el criterio de tipo de drenaje, y el de los entrecruzados y aislados bajo el criterio de dispersión agrupada (**Tabla 28**).

Tabla 28. Sensibilidad de los tipos de patrón de lineamientos a diferentes tratamientos

| Tipo de Patrón de Lineamientos | Sensibilidad al tratamiento | | | |
|--------------------------------|-----------------------------|----------|-----------------|---------------------|
| | Frecuencia | Densidad | Tipo de drenaje | Dispersión agrupada |
| Paralelos | X | - | X | - |
| Entrecruzados | - | X | X | X |
| Dendrítico | X | - | X | - |
| Aislados | - | X | X | X |

3.3.3.2 EXTRACCIÓN AUTOMÁTICA DE LINEAMIENTOS Y ANÁLISIS

De manera complementaria se llevó a cabo una extracción automática de lineamientos, basada en la metodología propuesta por Abdullah Anwar (2010). Como primer paso se generaron ocho Imágenes de Relieve Sombreado (Escala fuente 1:50,000) con azimut de iluminación de 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270 y 315° respectivamente, 30° de altitud solar y 3 puntos de contraste, esto con el propósito de poner en evidencia gráfica las características del relieve (Abdullah, y otros, 2010) (**Figura 119**)¹¹⁷. Posteriormente dichas imágenes fueron agrupadas en dos conjuntos: 0, 45, 90, 135° y 180, 225, 270, 315°, donde cada uno de ellos fue sometido a superposición gráfica por suma equivalente de rasters, para generar dos nuevas imágenes de consenso (**Figura 120**) (**Figura 121**). A continuación se procedió a aumentar el contraste y nitidez de las imágenes a fin de resaltar bordes, esto se realizó con el software Adobe Photoshop CS5 Extended Versión 12.0 x64, mediante superposición de capas duplicadas y filtrado por paso alto (3 pixeles, 100%) (**Figura 122**) (**Figura 123**).

¹¹⁵ Distribución estadística de un conjunto de valores (Real Academia Española, 2011).

¹¹⁶ Dentro de cada tratamiento se consideraron sensibles los dos valores más destacados, los extremos o el conjunto completo, según el caso.

¹¹⁷ Por cuestiones de comparación visual y presentación, omítase la escala numérica de la Figura 119 a la 123.

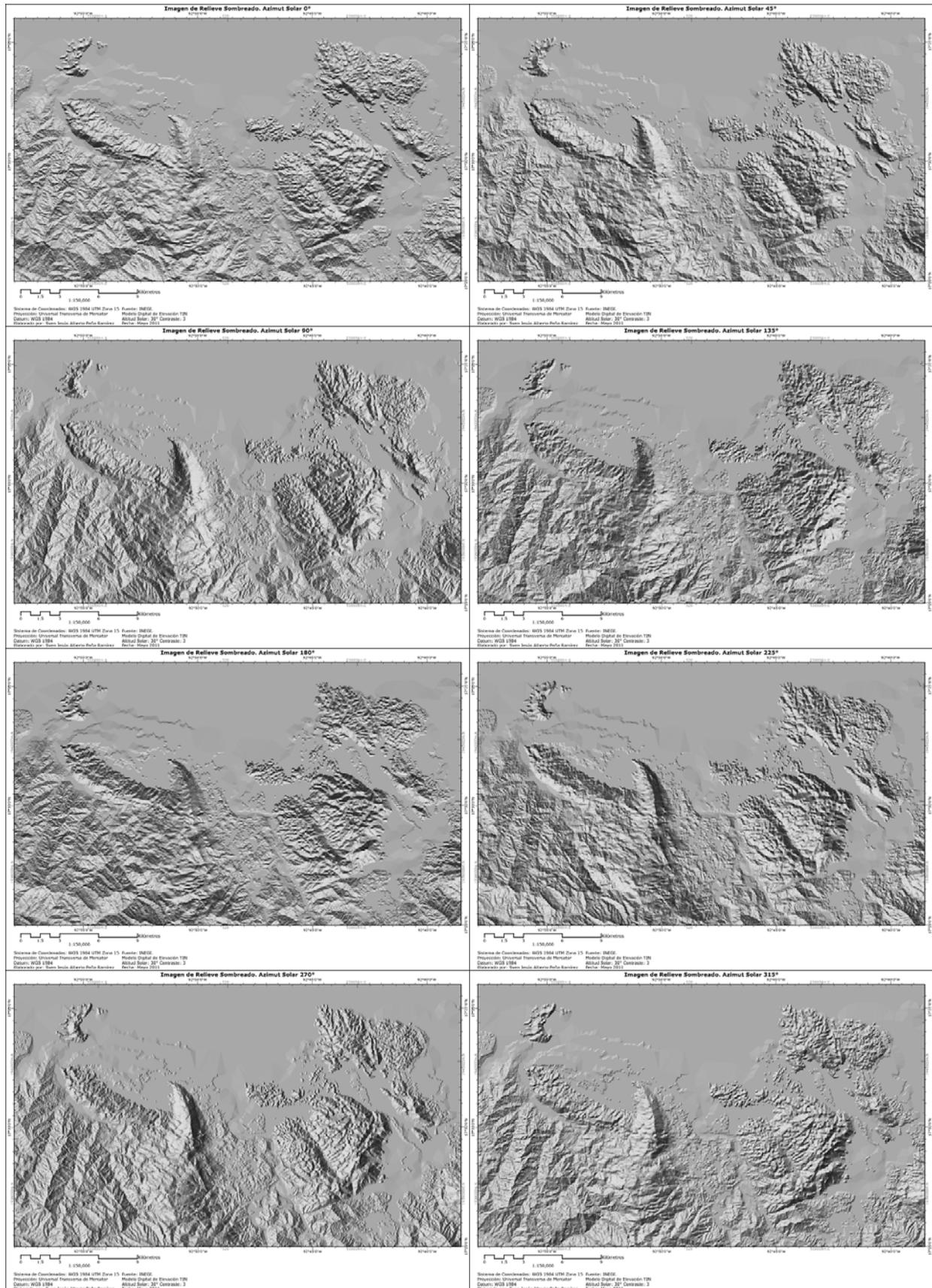


Figura 119. Imágenes de Relieve Sombreado con azimut de iluminación de 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270 y 315°

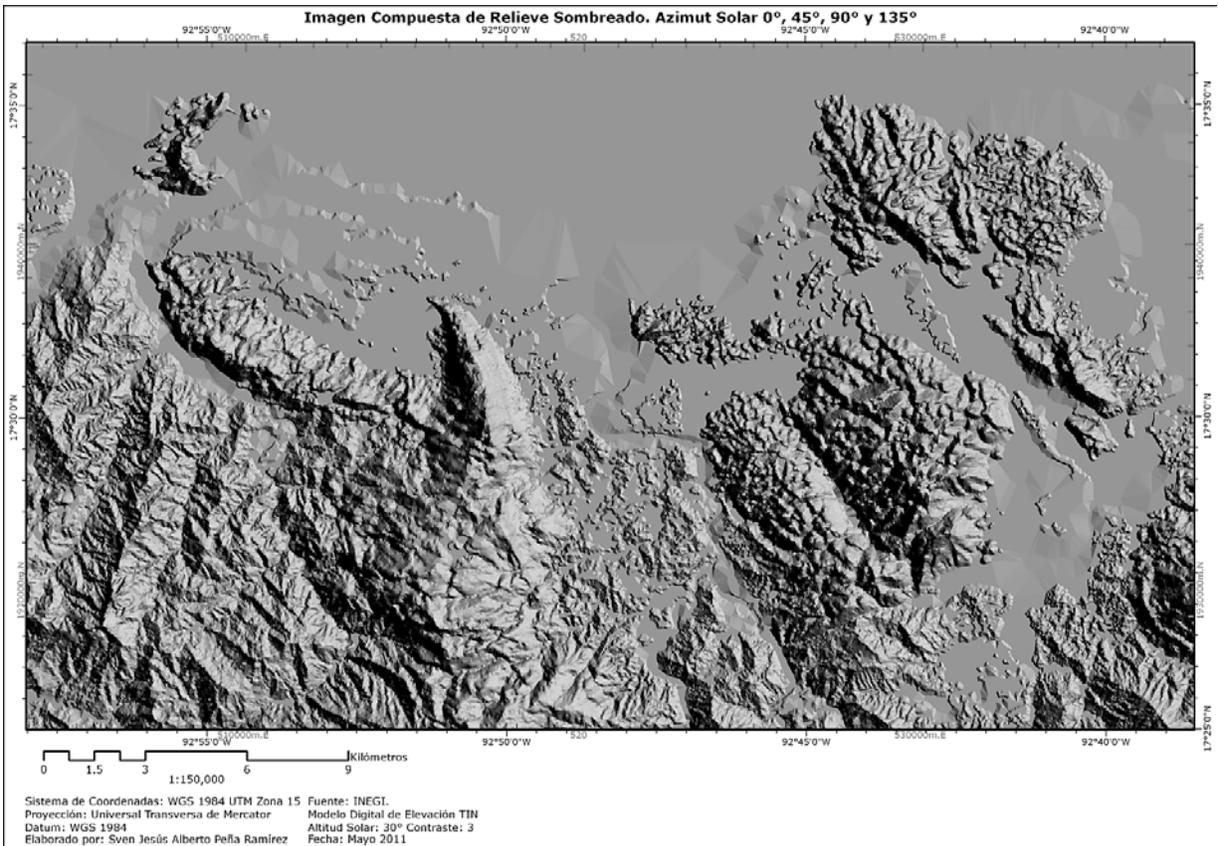


Figura 120. Imagen Compuesta de Relieve Sombreado con azimut de iluminación de 0, 45, 90 y 135°

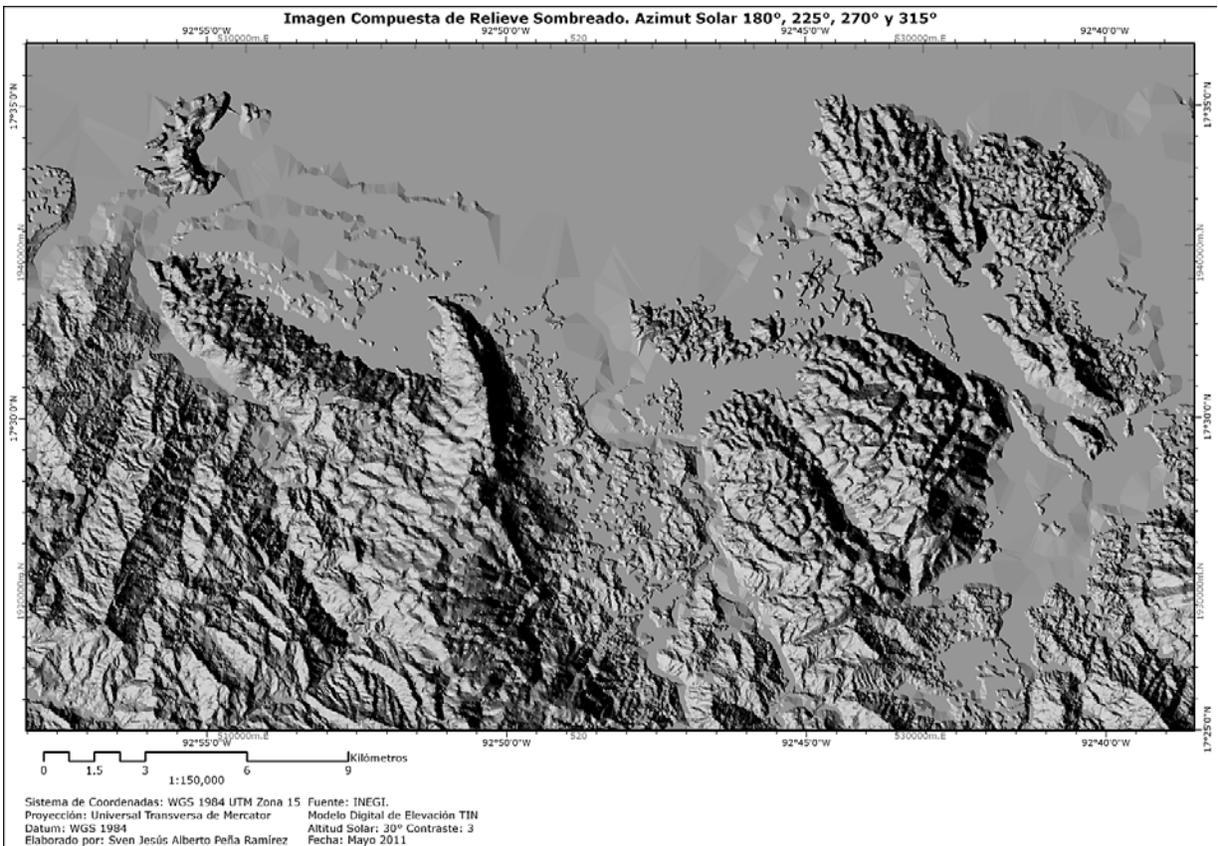


Figura 121. Imagen Compuesta de Relieve Sombreado con azimut de iluminación de 180, 225, 270 y 315°

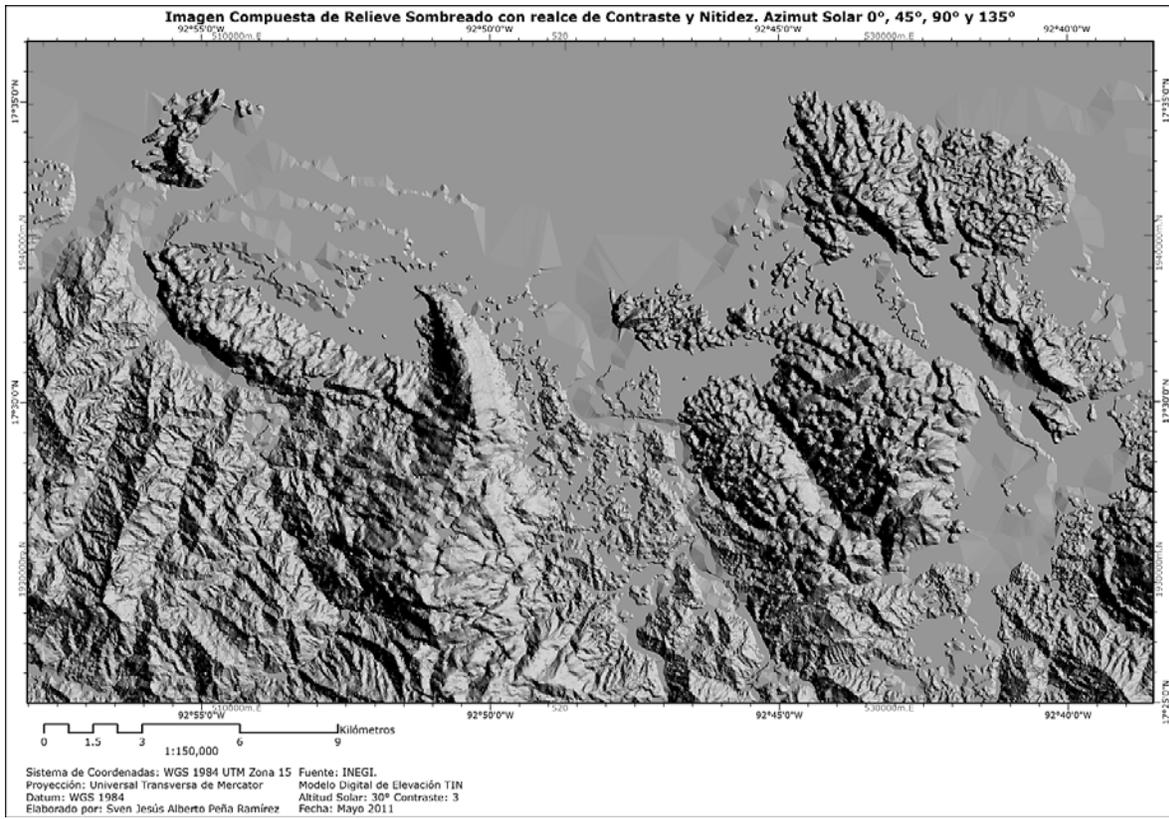


Figura 122. Imagen Compuesta de Relieve Sombreado con realce de Contraste y Nitidez. Azimut de iluminación de 0, 45, 90 y 135°

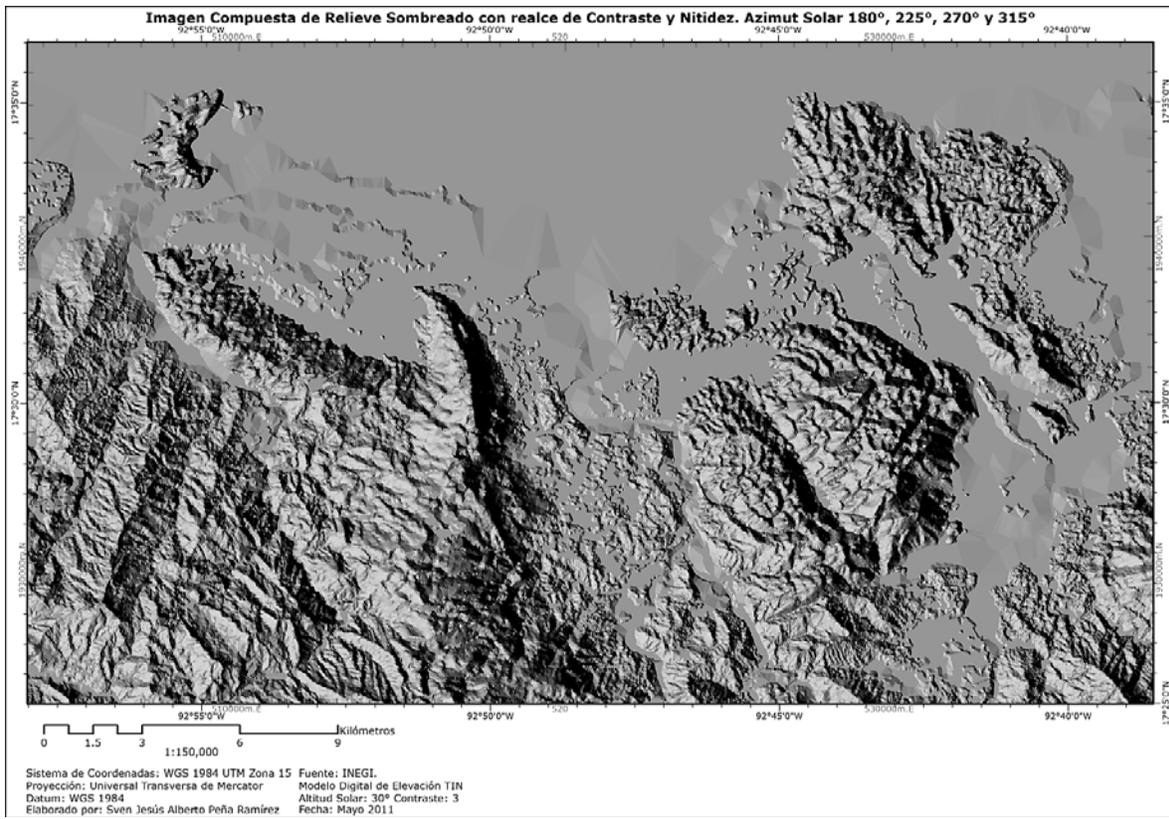


Figura 123. Imagen Compuesta de Relieve Sombreado con realce de Contraste y Nitidez. Azimut de iluminación de 180, 225, 270 y 315°

Listas ambas imágenes, se les aplicó el algoritmo de extracción de lineamientos (Lineament Extraction) provisto como herramienta de análisis espacial en el software PCI Geomatica Versión 10.0. Los parámetros de ajuste se describen en la **Tabla 29** (Abdullah, y otros, 2010). Finalmente, las imágenes resultantes fueron vectorizadas y georeferenciadas (**Mapa 15**) (**Mapa 16**).

Tabla 29. Parámetros de ajuste para el algoritmo de extracción de lineamientos en PCI Geomatica 10

| Parámetro ¹¹⁸ | Descripción | Valor |
|--------------------------|--|-------|
| RADI | Radio de Filtro (Píxeles) | 12 |
| GTHR | Umbral para el Borde del Gradiente | 90 |
| LTHR | Umbral para la Longitud de la Curva (Píxeles) | 30 |
| FTHR | Umbral para el Error de la Línea de Ajuste (Píxeles) | 10 |
| ATHR | Umbral para la Diferencia Angular (Grados) | 30 |
| DTHR | Umbral para la Distancia de Enlace (Píxeles) | 20 |

Se extrajeron aproximadamente 13,590 lineamientos en cada una de las imágenes compuestas. Cabe mencionar que el área seleccionada se extendió más allá del PEST cubriendo poco más de 680 Km², por lo que al área kárstica del PEST y zona de influencia corresponderían 6000 lineamientos aproximadamente. En ambos casos, el conteo de lineamientos se realizó bajo el procedimiento de estimación por extrapolación, es decir, contando visualmente el número de lineamientos en un Km² (en un área con densidad media) y multiplicándolo por el área (en Km²) correspondiente a la selección inicial y al área kárstica del PEST y zona de influencia.

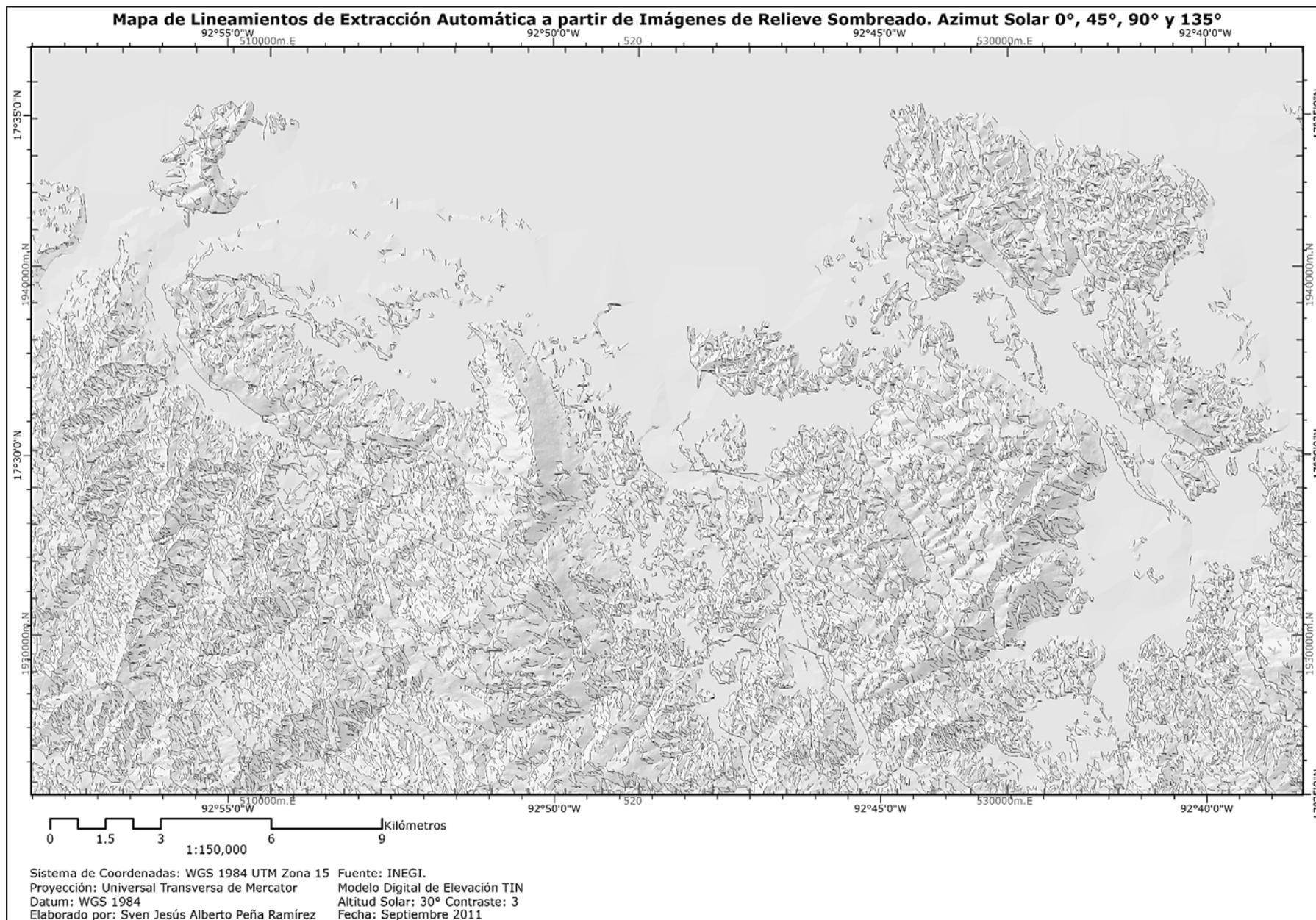
Basado en el análisis de patrones de orientación, longitud de lineamientos, relaciones espaciales, e interpretación visual de los mapas de lineamientos de extracción automática, mapa hidrográfico, MDE en tercera dimensión y ortofotos, los lineamientos extraídos de la imagen de consenso con azimut de iluminación de 0, 45, 90 y 135°, denotan en su mayoría las alineaciones positivas del relieve (**Mapa 15**). Como consecuencia, es clara la relación existente entre estos lineamientos y el patrón de distribución topográfico. Por otro lado, los lineamientos extraídos de la imagen de consenso con azimut de iluminación de 180, 225, 270 y 315°, están ampliamente relacionados con las alineaciones negativas del relieve (**Mapa 16**). Por tanto, estos lineamientos mantienen una estrecha relación con los patrones de drenaje y fracturamiento, y en especial con los ríos de tercer y cuarto orden. Una desventaja de este método es que no discrimina características antrópicas o de naturaleza no geológica durante el análisis. Esta podría ser una razón por la que se ve incrementado el número y longitud de lineamientos (Abdullah, y otros, 2010).

Toda vez que ambos métodos se basaron en la misma fuente de información, los resultados verifican la similitud en el patrón de orientación de los lineamientos. Esto queda evidenciado de forma gráfica al superponer los lineamientos de extracción automática sobre los de interpretación visual (**Mapa 17**) (**Mapa 18**). A su vez, es evidente que el método de extracción automática identifica un mayor número de lineamientos (6000>1405), al igual que suma una mayor longitud total de los mismos (**Mapa 17**) (**Mapa 18**).

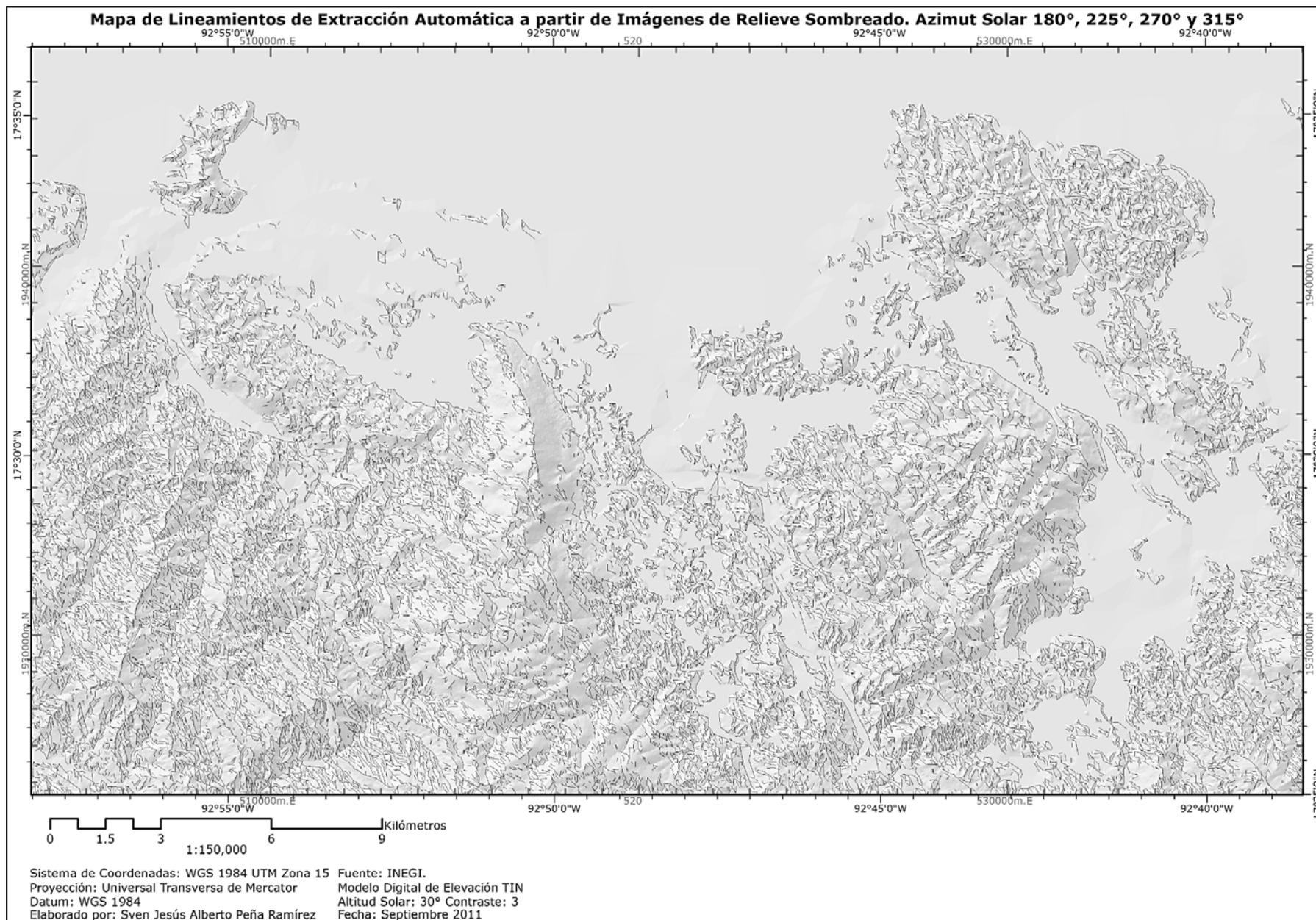
En conclusión, la mayoría de los lineamientos en el área de estudio mantienen una orientación preferente NE-SW, con un componente secundario NW-SE (**Figura 101**) (**Tabla 23**). Los lineamientos de extracción automática muestran, en ambas imágenes, la significancia de los trazos con orientación NE-SW (**Mapa 15**) (**Mapa 16**), lo cual coincide con la orientación de los lineamientos de interpretación visual (**Mapa 17**) (**Mapa 18**). Los resultados revelan el control estructural que ejerce el sistema de fracturamiento regional sobre el relieve. Así, es muy probable que la orientación preferente NE-SW de los lineamientos esté controlada por el sistema de fracturamiento "reciente" (Mioceno-Plioceno), producto de los desplazamientos laterales

¹¹⁸ Por sus siglas en inglés.

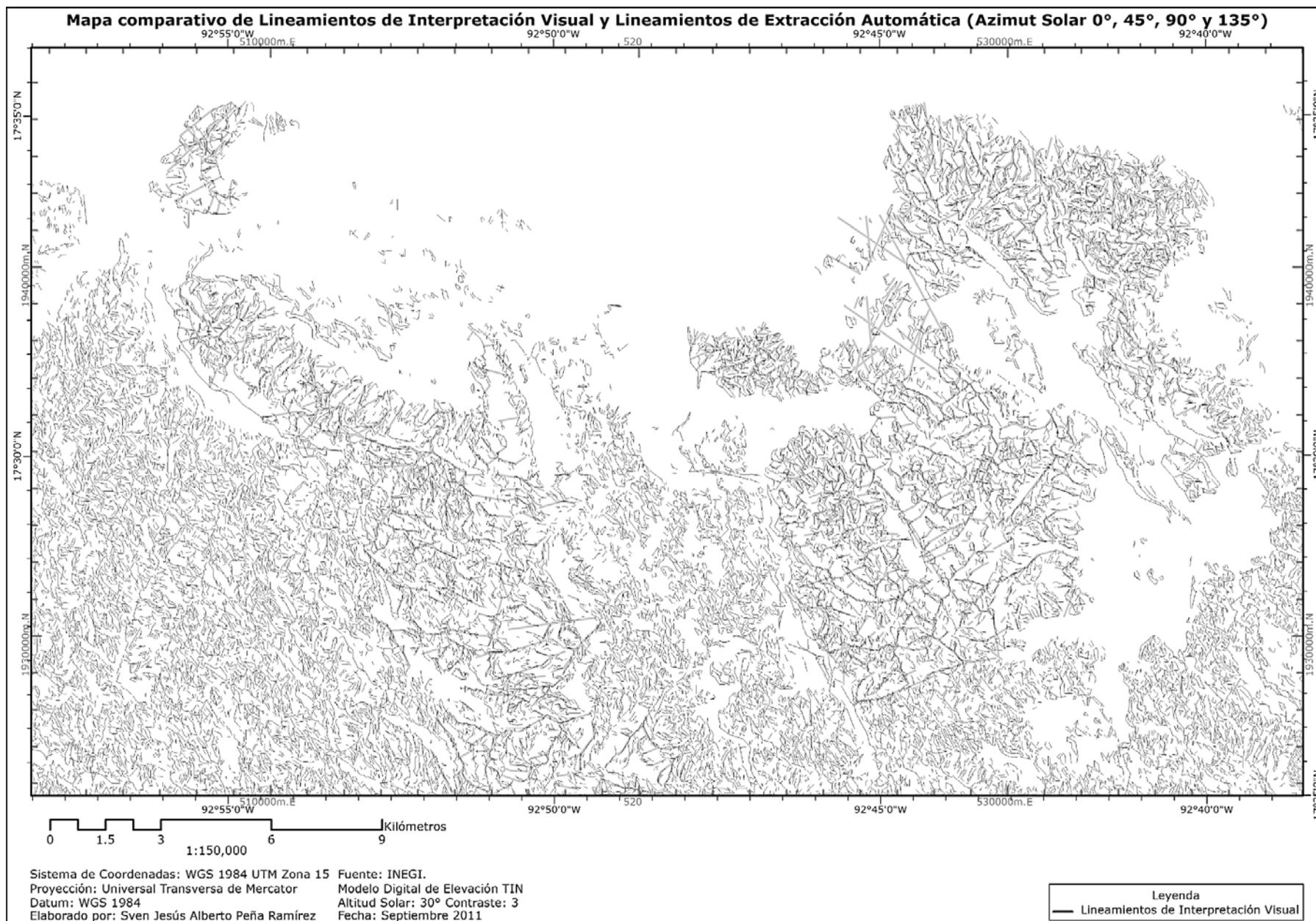
izquierdos asociados al sistema Polochic-Motagua (véase **2.5.1.1.2**); por su parte el componente secundario NW-SE puede deberse muy probablemente al sistema de fracturamiento "antiguo" (Cretácico tardío), resultado del plegamiento y formación de la Sierra Madre Oriental (véase **2.5.1.1.2**).



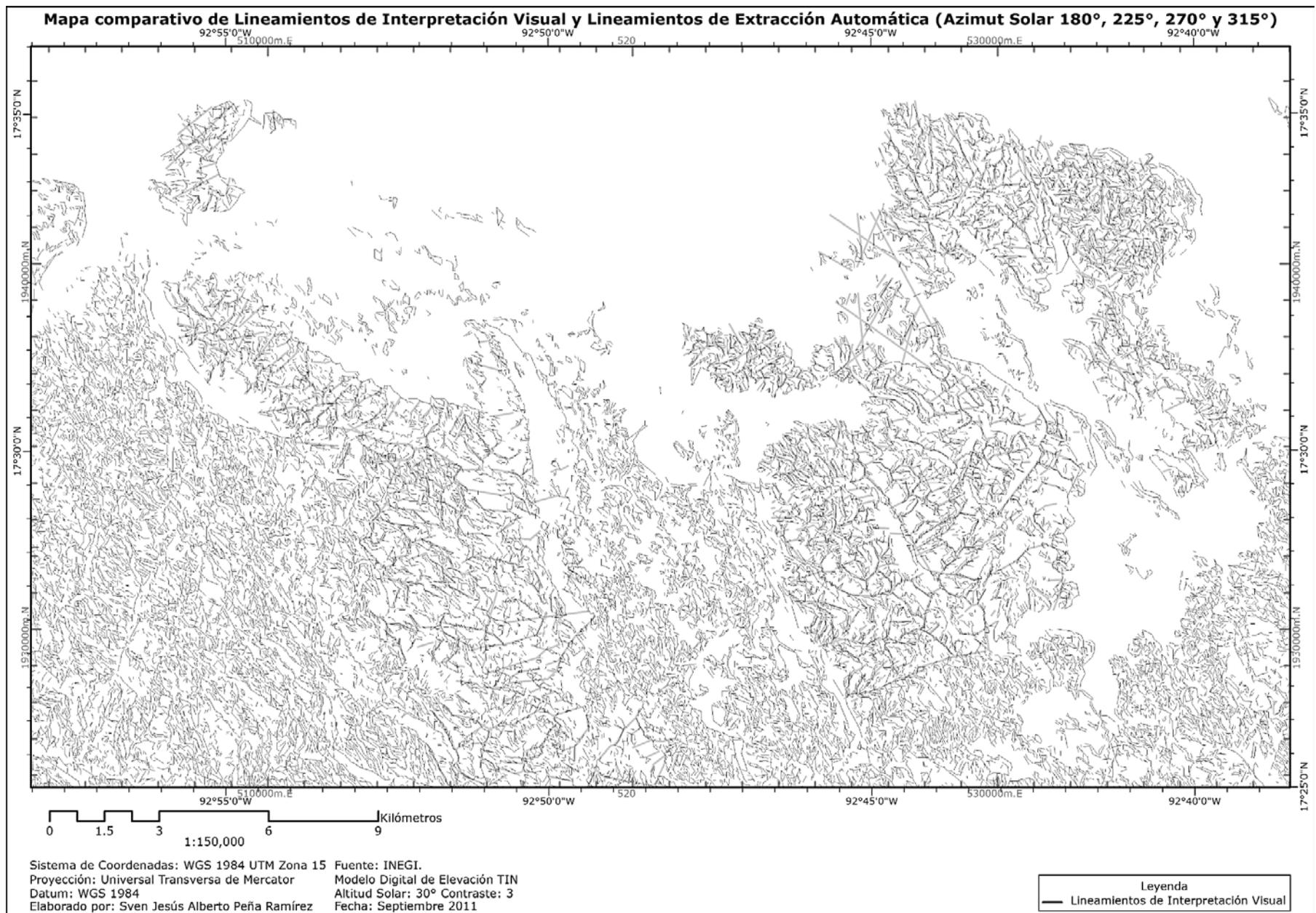
Mapa 15. Mapa de Lineamientos de Extracción Automática a partir de Imágenes de Relieve Sombreado. Azimut Solar 0°, 45°, 90° y 135°



Mapa 16. Mapa de Lineamientos de Extracción Automática a partir de Imágenes de Relieve Sombreado. Azimut Solar 180°, 225°, 270° y 315°



Mapa 17. Mapa comparativo de Lineamientos de Interpretación Visual y Lineamientos de Extracción Automática (Azimut Solar 0°, 45°, 90° y 135°)



Mapa 18. Mapa comparativo de Lineamientos de Interpretación Visual y Lineamientos de Extracción Automática (Azimut Solar 180°, 225°, 270° y 315°)

3.3.4 MORFOMETRÍA Y ANÁLISIS DE DEPRESIONES KÁRSTICAS

En estrecha relación con los lineamientos se encuentran las depresiones cerradas. En los paisajes kársticos las alineaciones describen, en la mayoría de los casos, los ejes de dolinas y poljes. El análisis de depresiones kársticas, y en particular, el de caracteres espaciales como el orden de escurrimiento (**Figura 124**), tipo evolutivo (**Figura 80**) y densidad; y caracteres morfométricos como la longitud de los ejes mayor y menor, proveen información de alto valor geomorfológico, la cual contribuye en la caracterización de los distintos paisajes kársticos (Haryono, y otros, 2004), y por ende, en su discriminación espacial.

Al tratarse de unidades geomorfológicas, tanto el análisis de depresiones kársticas como el de colinas kársticas residuales demandaron una mayor escala de estudio (Carvajal, y otros, 2004). Así, la extracción de depresiones cerradas se realizó a partir de un Mapa Altimétrico Vectorial con curvas de nivel cada 10m., generado de un Modelo Digital de Elevación tipo *Nube de Puntos*, construido a partir del *Modelo Digital de Elevación LIDAR Tipo Terreno*¹¹⁹ de INEGI, con resolución de 5m. (E15D21D2, E15D21D4, E15D21E3, E15D21E4, E15D21F1, E15D21F2, E15D21F3, E15D21F4, E15D22D3, E15D31B1, E15D31B2, E15D31B3, E15D31B4, E15D31C1, E15D31C2, E15D31C3, E15D31C4). La selección de dicho material responde a que la morfometría kárstica tropical demanda una representación lo más fiel posible al relieve natural, es decir, que se debe omitir la vegetación y cualquier otro componente ajeno al terreno. El marco de trabajo considera el área kárstica del PEST y zona de influencia.

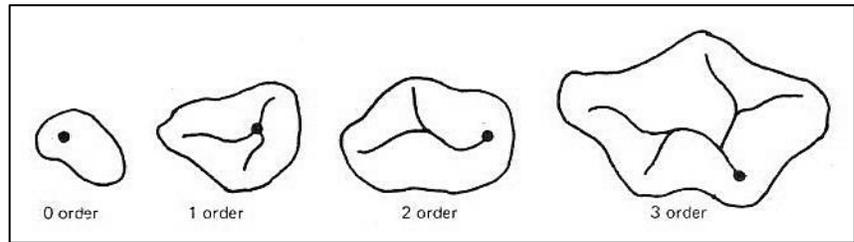


Figura 124. Descripción esquemática del orden de escurrimiento en las depresiones kársticas (White, 1988)

La extracción de depresiones kársticas se realizó sobre la plataforma digital de ArcGIS 10, y constó de cuatro pasos:

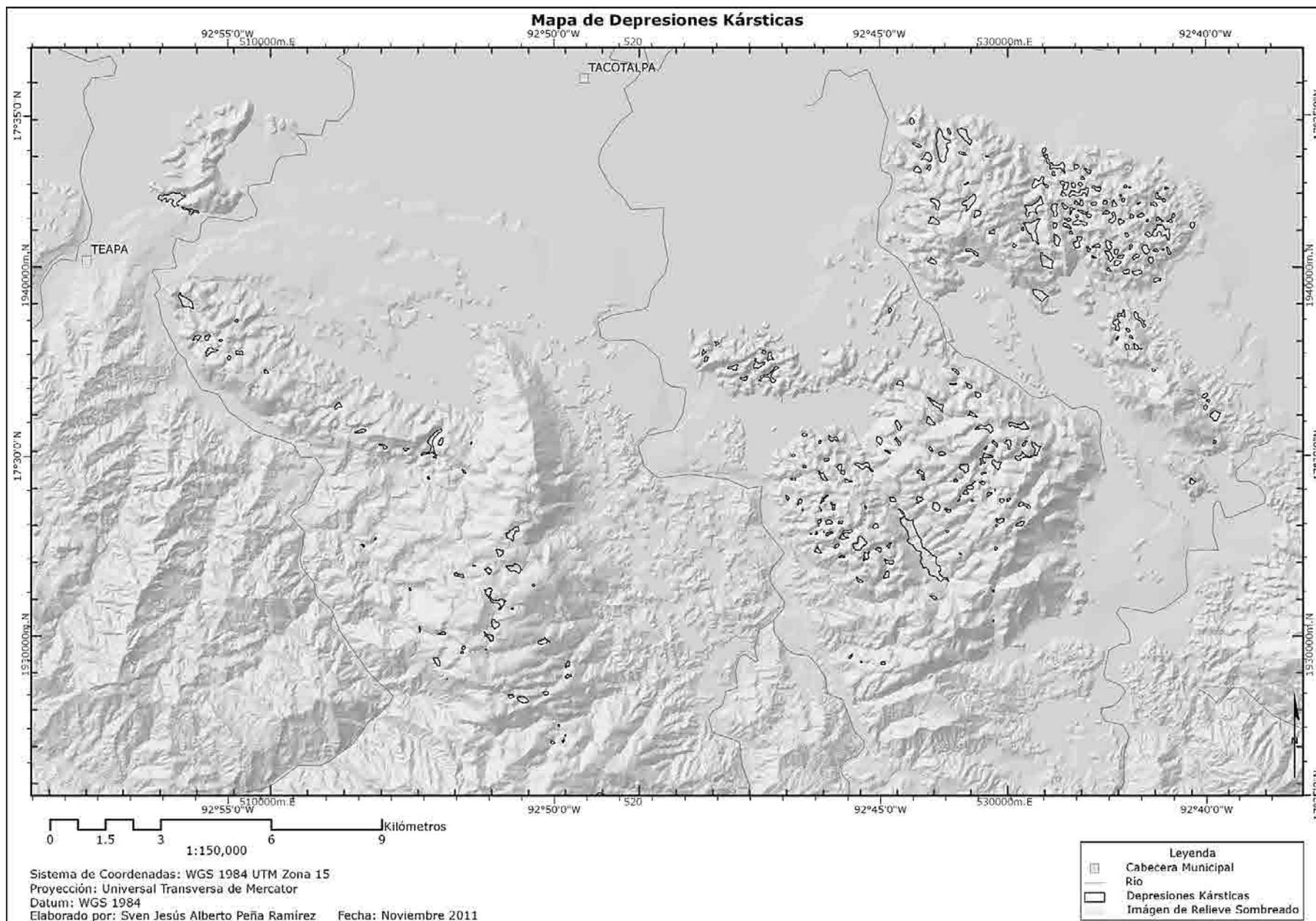
1. Selección de depresiones y colinas kársticas residuales de una o dos simas o cimas, respectivamente, y eliminación de curvas de nivel externas.
2. Eliminación de colinas kársticas residuales. Esto se realizó bajo el análisis simultáneo de curvas de nivel e interpretación visual del MDE en tercera dimensión desplegado en ArcScene 10.
3. Selección de depresiones kársticas de una sima o de dos simas, siempre y cuando éstas no superen los 10m. de diferencia¹²⁰; y separación de depresiones kársticas de dos simas cuya diferencia supera los 10m¹²¹.
4. Eliminación de curvas de nivel internas.

Se reconocieron un total de 282 depresiones kársticas (**Mapa 19**).

¹¹⁹ Es un registro de las elevaciones existentes sobre el nivel del mar derivado de la obtención de puntos mediante tecnología LIDAR (detección y medición a través de la luz). El LIDAR es un sistema activo de rayos láser que emite un haz de luz sobre la superficie terrestre (pulsos) para luego recoger sus reflejos, también denominados retornos o rebotes. El modelo digital del terreno LIDAR se obtiene de la nube de puntos ajustada al terreno mediante procesos geodésicos, de la que se seleccionan aquellos puntos que corresponden únicamente al terreno, generando una "nube de puntos clasificada" a la que se le aplica una interpolación a los puntos clasificados del último retorno y habiendo eliminado aquellos puntos que no pertenecen al terreno como los reflejados por infraestructura, vegetación y objetos aéreos como nubes o pájaros, de esta manera se puede generar un modelo digital de elevación de tipo terreno con una resolución horizontal de 5 m (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2011).

¹²⁰ Esto en función de la escala de estudio con curvas de nivel cada 10m.

¹²¹ A razón de que en la presente investigación se prefirió dar más peso al criterio de dolinización que al de asociación.



Mapa 19. Mapa de Depresiones Kársticas

Tras ello se procedió a analizar tres caracteres espaciales: densidad, tipo evolutivo y orden de escurrimiento; y dos morfométricos: longitud de los ejes mayor y menor.

El análisis de densidad requirió de dos tratamientos: la construcción de un Mapa de Densidad de Depresiones Kársticas (**Mapa 20**), el cual, al igual que el de Densidad de Lineamientos, se realizó bajo el estándar de densidad kernel, expresado en cuatro clases seleccionadas por cortes naturales (jenks), con rangos de 0-193 (Baja), 193-713 (Media), 713-1,620 (Alta), y 1,620-3,789 (Muy Alta); y el cálculo de la densidad de depresiones kársticas por patrón de lineamientos, dividiendo el número de depresiones consideradas por polígono, entre el área correspondiente en Km² (**Tabla 30**) (**Figura 125**). En este tratamiento también fue necesaria la fragmentación del shapefile original de depresiones kársticas en 19 shapefiles correspondientes a los 19 patrones de lineamientos, y 4 shapefiles correspondientes a los 4 tipos de patrón de lineamientos. Asimismo, la selección de depresiones para cada polígono implicó entidades totales y/o parciales, no puntuales. La **Tabla 31** enlista la densidad de depresiones kársticas por tipo de patrón.

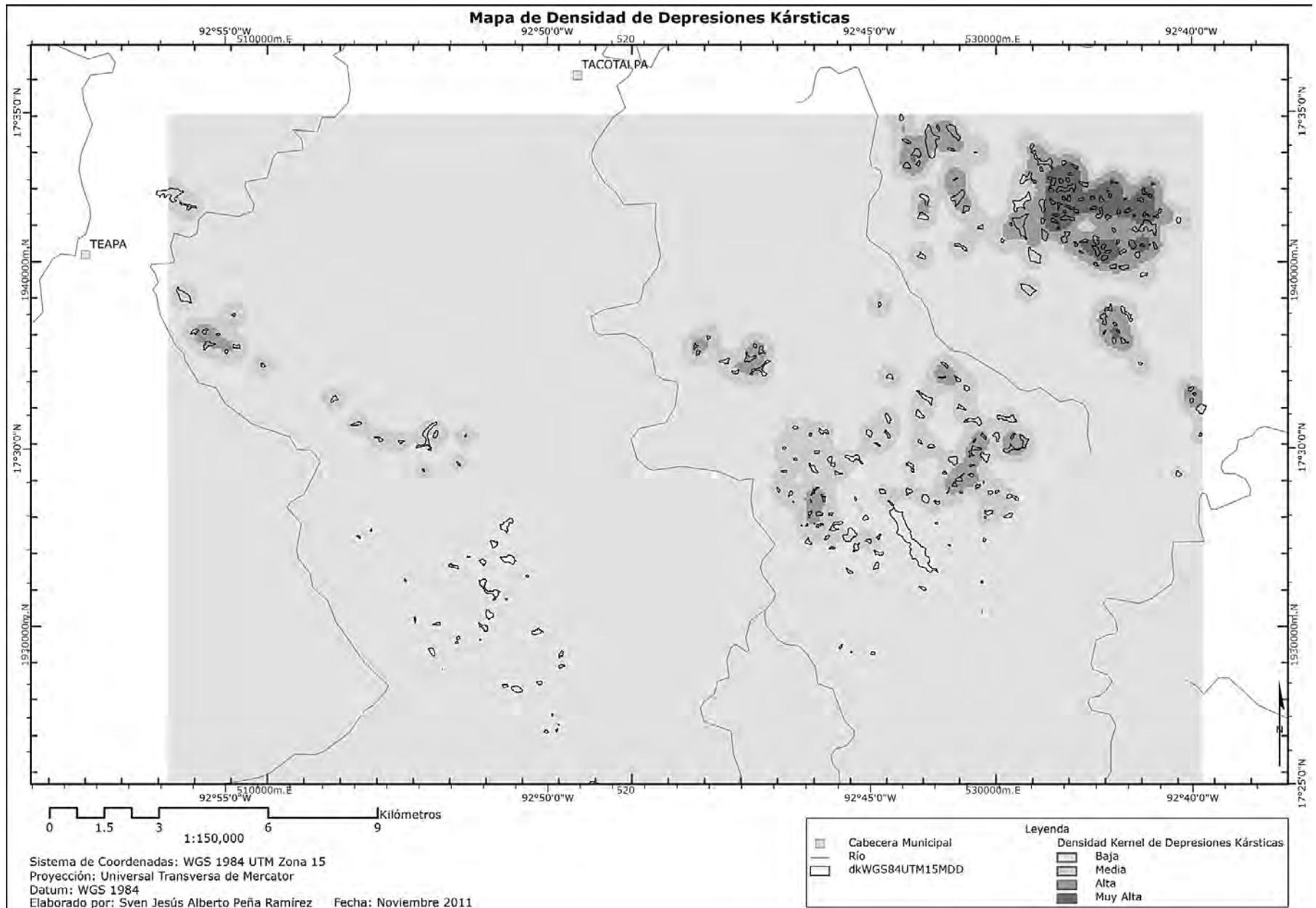
Tabla 30. Densidad de depresiones kársticas por patrón

| Patrón de Lineamientos | Depresiones Kársticas por patrón | Área (Km ²) | Densidad de Depresiones Kársticas |
|------------------------|----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 2 | 7.42277644868 | 0.27 |
| 2 | 38 | 68.51816936940 | 0.55 |
| 3 | 6 | 1.22871015975 | 4.88 |
| 4 | 7 | 4.97531635418 | 1.41 |
| 5 | 3 | 2.67499766010 | 1.12 |
| 6 | 1 | 4.27934903346 | 0.23 |
| 7 | 10 | 5.54898488385 | 1.80 |
| 8 | 1 | 12.53325574640 | 0.08 |
| 9 | 26 | 18.22455132600 | 1.43 |
| 10 | 0 | 3.65934856975 | 0 |
| 11 | 1 | 1.62243086234 | 0.62 |
| 12 | 72 | 12.34690420180 | 5.83 |
| 13 | 15 | 8.87098545675 | 1.69 |
| 14 | 1 | 0.96962250616 | 1.03 |
| 15 | 8 | 2.76849059925 | 2.89 |
| 16 | 35 | 8.67876423262 | 4.03 |
| 17 | 1 | 4.71389753706 | 0.21 |
| 18 | 30 | 35.77902452850 | 0.84 |
| 19 | 32 | 7.94490693292 | 4.03 |

Los resultados demuestran una mayor densidad de depresiones kársticas en la mayoría de los patrones entrecruzados, seguidos en su conjunto por los paralelos, dendríticos, y finalmente los aislados (**Tabla 30**) (**Figura 125**) (**Mapa 20**). Esto es corroborado por los valores de densidad correspondientes a los tipos de patrón de lineamientos (**Tabla 31**).

Tabla 31. Densidad de depresiones kársticas por tipo de patrón

| Tipo de Patrón de Lineamientos | Depresiones Kársticas por patrón | Área (Km ²) | Densidad de Depresiones Kársticas |
|--------------------------------|----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| Paralelos | 120 | 142.55362023474 | 0.84 |
| Entrecruzados | 162 | 40.72358676512 | 3.98 |
| Dendrítico | 6 | 13.29067509296 | 0.45 |
| Aislados | 1 | 16.19260431615 | 0.06 |



Mapa 20. Mapa de Densidad de Depresiones Kársticas

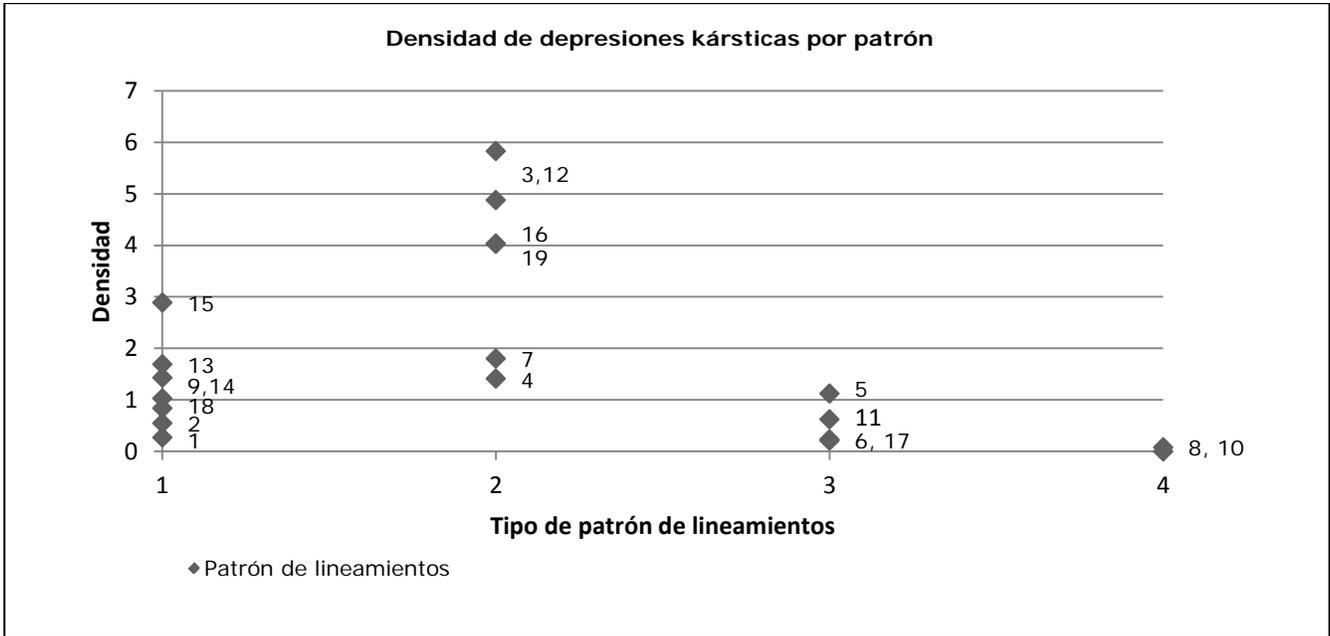


Figura 125. Gráfica de densidad de depresiones kársticas por patrón
 1) Paralelos, 2) Entrecruzados, 3) Dendrítico, 4) Aislados

El tipo evolutivo (Figura 80) se determinó con base en la longitud del eje mayor y en las características del fondo, considerándose poljes a aquellas depresiones kársticas cuyo eje mayor supera o se acerca a 1 Km de longitud (Gutiérrez Elorza, 2008) y que presentan un fondo mas o menos plano (véase 3.3.1.4). La determinación del tipo de polje se basó en la clasificación de Ford y Williams (2007) (Figura 64) (Apéndice 1). Así, de las 282 depresiones kársticas se diferenciaron 279 dolinas, 1 polje de nivel base y 2 poljes de nivel base relictos (Mapa 21).

El orden de escurrimiento fue determinado a partir del estudio de curvas de nivel internas y bajo el criterio de clasificación de White (1988) (Figura 124) (Apéndice 1). Este trabajo implicó el trazado de valles internos en cada depresión kárstica. Como resultado, se diferenciaron 20 depresiones kársticas de orden 0, 134 de primer orden, 114 de segundo orden y 14 de tercer orden (Mapa 21). Como lo propone el análisis de frecuencia para depresiones cerradas de White (1988) (Figura 126), en la Figura 127 se muestra la gráfica de distribución del número de depresiones cerradas del PEST en función de su orden. Las gráficas correspondientes a los 4 tipos de patrón de lineamientos (agrupados) se presentan en la Figura 128.

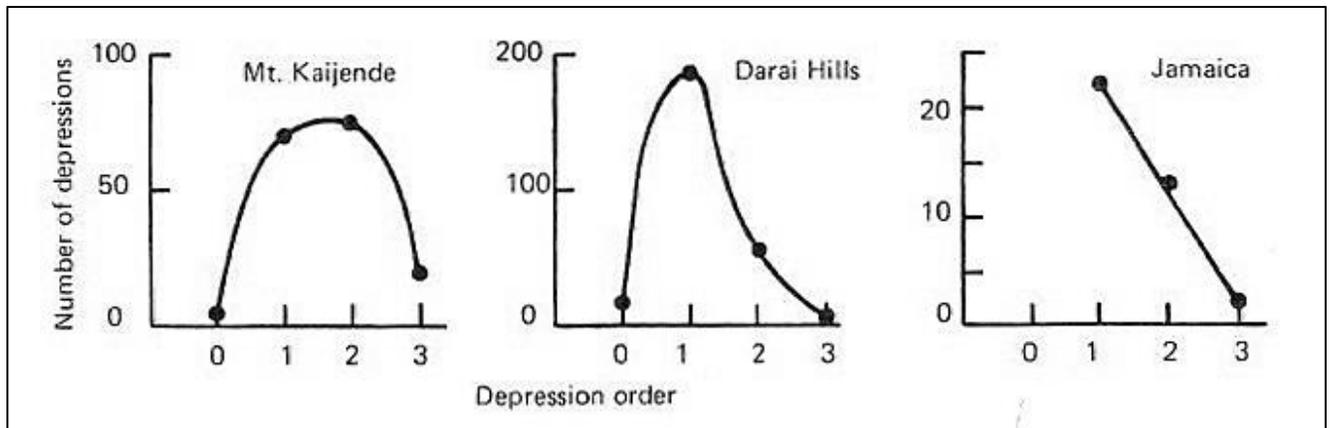
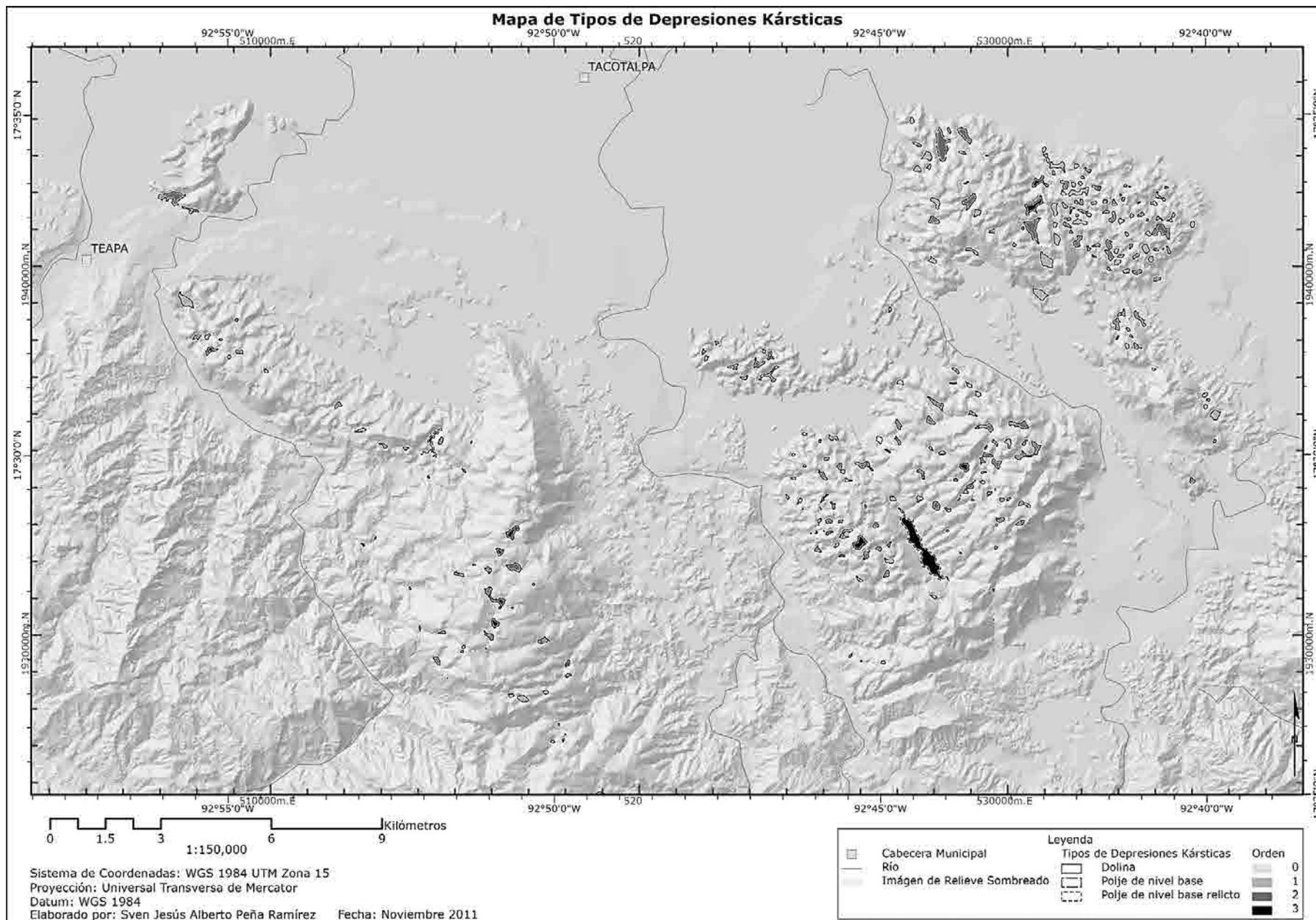


Figura 126. Distribución del número de depresiones cerradas en función de su orden para tres áreas de karst tropical (White, 1988)
 Mt. Kaijende y las montañas Darai en Nueva Guinea (Williams, 1971) y Jamaica (Day, 1976)



Mapa 21. Mapa de Tipos de Depresiones Kársticas

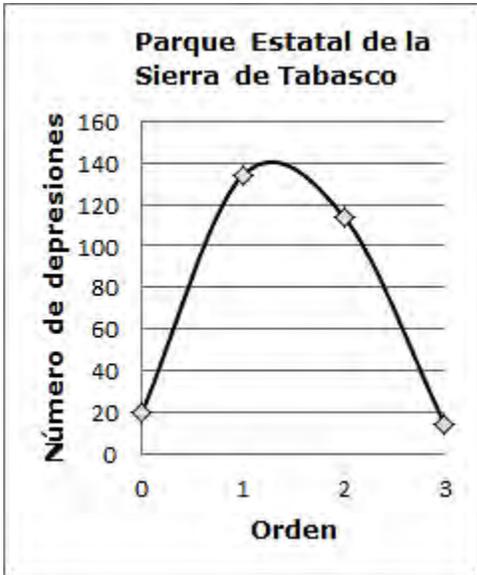


Figura 127. Distribución del número de depresiones cerradas del PEST en función de su orden

Como puede observarse en la **Figura 127** las depresiones kársticas del PEST presentan una distribución de frecuencia curva, donde la mayoría de ellas son de primer orden, seguidas por las de segundo orden y finalmente las de orden 0 y 1. Dicha distribución coincide ampliamente con las del tipo de patrón de lineamientos paralelos y entrecruzados (**Figura 128**). Las gráficas correspondientes al tipo de patrón de dendrítico y aislados carecen de significancia debido a su baja densidad de depresiones cerradas (**Tabla 31**) (**Figura 128**). Ha de notarse que la distribución de frecuencia del PEST se asemeja a la de las montañas Darai y Jamaica (**Figura 127**) (**Figura 126**).

La morfometría se realizó sobre la plataforma digital de ArcMap. El eje mayor se calculó a partir de los puntos más extremos de la depresión, siendo este rectilíneo o curvo, según la forma. El eje menor fue medido perpendicularmente al eje mayor y de preferencia en el punto medio (**Apéndice 1**). Las **Tablas 32, 33 y 34** muestran el informe morfométrico¹²² de las depresiones kársticas del PEST, de los 19 patrones de lineamientos, y de los 4 tipos de patrón de lineamientos (agrupados).

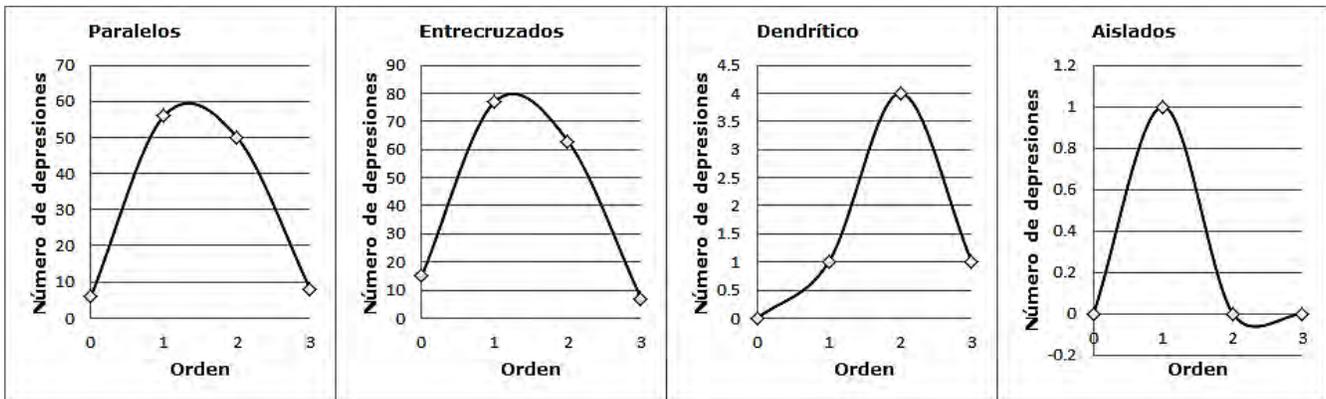


Figura 128. Distribución del número de depresiones cerradas en función de su orden para los 4 tipos de patrón de lineamientos (agrupados)

Tabla 32. Informe morfométrico de las depresiones kársticas del Parque Estatal de la Sierra de Tabasco

| Área: Parque Estatal de la Sierra de Tabasco | | | | | |
|--|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-----|
| Orden | Rango de longitud del eje mayor (m) | Longitud media del eje mayor (m) | Rango de longitud del eje menor (m) | Longitud media del eje menor (m) | N |
| 0 | 29-216 | 87 | 18-132 | 48 | 20 |
| 1 | 25-839 | 178 | 12-274 | 70 | 134 |
| 2 | 41-921 | 248 | 19-255 | 80 | 114 |
| 3 | 203-2194 | 551 | 62-187 | 120 | 14 |

Tabla 33. Informe morfométrico de las depresiones kársticas de los 19 patrones de lineamientos

| Área: Patrón de Lineamientos 1 | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|---|
| Orden | Rango de longitud del eje mayor (m) | Longitud media del eje mayor (m) | Rango de longitud del eje menor (m) | Longitud media del eje menor (m) | N |
| 0 | | | | | 0 |
| 1 | 485 | 485 | 52 | 52 | 1 |
| 2 | 741 | 741 | 139 | 139 | 1 |
| 3 | | | | | 0 |

¹²² Elaborado con base en el modelo de Haryono y Day (2004).

| Área: Patrón de Lineamientos 2 | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|----|
| Orden | Rango de longitud del eje mayor (m) | Longitud media del eje mayor (m) | Rango de longitud del eje menor (m) | Longitud media del eje menor (m) | N |
| 0 | | | | | 0 |
| 1 | 25-574 | 158 | 15-211 | 65 | 16 |
| 2 | 74-476 | 207 | 30-191 | 85 | 16 |
| 3 | 203-1042 | 459 | 65-156 | 109 | 6 |

| Área: Patrón de Lineamientos 3 | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|---|
| Orden | Rango de longitud del eje mayor (m) | Longitud media del eje mayor (m) | Rango de longitud del eje menor (m) | Longitud media del eje menor (m) | N |
| 0 | | | | | 0 |
| 1 | 112-186 | 149 | 73-84 | 79 | 2 |
| 2 | 105-246 | 191 | 51-67 | 61 | 3 |
| 3 | 409 | 409 | 82 | 82 | 1 |

| Área: Patrón de Lineamientos 4 | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|---|
| Orden | Rango de longitud del eje mayor (m) | Longitud media del eje mayor (m) | Rango de longitud del eje menor (m) | Longitud media del eje menor (m) | N |
| 0 | 75 | 75 | 43 | 43 | 1 |
| 1 | 160-317 | 44 | 44-57 | 51 | 3 |
| 2 | 220-263 | 53 | 53-59 | 56 | 2 |
| 3 | 1042 | 1024 | 104 | 104 | 1 |

| Área: Patrón de Lineamientos 5 | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|---|
| Orden | Rango de longitud del eje mayor (m) | Longitud media del eje mayor (m) | Rango de longitud del eje menor (m) | Longitud media del eje menor (m) | N |
| 0 | | | | | 0 |
| 1 | | | | | 0 |
| 2 | 64-273 | 137 | 19-120 | 64 | 3 |
| 3 | | | | | 0 |

| Área: Patrón de Lineamientos 6 | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|---|
| Orden | Rango de longitud del eje mayor (m) | Longitud media del eje mayor (m) | Rango de longitud del eje menor (m) | Longitud media del eje menor (m) | N |
| 0 | | | | | 0 |
| 1 | | | | | 0 |
| 2 | 233 | 233 | 47 | 47 | 1 |
| 3 | | | | | 0 |

| Área: Patrón de Lineamientos 7 | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|---|
| Orden | Rango de longitud del eje mayor (m) | Longitud media del eje mayor (m) | Rango de longitud del eje menor (m) | Longitud media del eje menor (m) | N |
| 0 | 73 | 73 | 50 | 50 | 1 |
| 1 | 130-200 | 158 | 52-82 | 67 | 4 |
| 2 | 126-553 | 327 | 57-134 | 82 | 4 |
| 3 | 239 | 239 | 81 | 81 | 1 |

| Área: Patrón de Lineamientos 8 | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|---|
| Orden | Rango de longitud del eje mayor (m) | Longitud media del eje mayor (m) | Rango de longitud del eje menor (m) | Longitud media del eje menor (m) | N |
| 0 | | | | | 0 |
| 1 | 148 | 148 | 69 | 69 | 1 |
| 2 | | | | | 0 |
| 3 | | | | | 0 |

| Área: Patrón de Lineamientos 9 | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|----|
| Orden | Rango de longitud del eje mayor (m) | Longitud media del eje mayor (m) | Rango de longitud del eje menor (m) | Longitud media del eje menor (m) | N |
| 0 | 60 | 60 | 41 | 41 | 1 |
| 1 | 61-520 | 241 | 20-274 | 95 | 16 |
| 2 | 68-921 | 404 | 27-255 | 138 | 8 |
| 3 | 621 | 621 | 111 | 111 | 1 |

| Área: Patrón de Lineamientos 10 | | | | | |
|---------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|---|
| Orden | Rango de longitud del eje mayor (m) | Longitud media del eje mayor (m) | Rango de longitud del eje menor (m) | Longitud media del eje menor (m) | N |
| 0 | | | | | 0 |
| 1 | | | | | 0 |
| 2 | | | | | 0 |
| 3 | | | | | 0 |

| Área: Patrón de Lineamientos 11 | | | | | |
|---------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|----|
| Orden | Rango de longitud del eje mayor (m) | Longitud media del eje mayor (m) | Rango de longitud del eje menor (m) | Longitud media del eje menor (m) | N |
| 0 | | | | | 0 |
| 1 | | | | | 0 |
| 2 | | | | | 0 |
| 3 | 549 | 549 | 176 | 176 | 1 |
| Área: Patrón de Lineamientos 12 | | | | | |
| Orden | Rango de longitud del eje mayor (m) | Longitud media del eje mayor (m) | Rango de longitud del eje menor (m) | Longitud media del eje menor (m) | N |
| 0 | 55-141 | 99 | 28-64 | 48 | 5 |
| 1 | 63-839 | 193 | 25-160 | 81 | 44 |
| 2 | 137-673 | 250 | 51-151 | 85 | 22 |
| 3 | 549 | 549 | 176 | 176 | 1 |
| Área: Patrón de Lineamientos 13 | | | | | |
| Orden | Rango de longitud del eje mayor (m) | Longitud media del eje mayor (m) | Rango de longitud del eje menor (m) | Longitud media del eje menor (m) | N |
| 0 | 47 | 47 | 32 | 32 | 1 |
| 1 | 95-265 | 152 | 59-210 | 93 | 7 |
| 2 | 91-491 | 235 | 33-81 | 61 | 7 |
| 3 | | | | | 0 |
| Área: Patrón de Lineamientos 14 | | | | | |
| Orden | Rango de longitud del eje mayor (m) | Longitud media del eje mayor (m) | Rango de longitud del eje menor (m) | Longitud media del eje menor (m) | N |
| 0 | | | | | 0 |
| 1 | | | | | 0 |
| 2 | 168 | 168 | 120 | 120 | 1 |
| 3 | | | | | 0 |
| Área: Patrón de Lineamientos 15 | | | | | |
| Orden | Rango de longitud del eje mayor (m) | Longitud media del eje mayor (m) | Rango de longitud del eje menor (m) | Longitud media del eje menor (m) | N |
| 0 | 29-33 | 31 | 18-24 | 21 | 2 |
| 1 | 45-168 | 107 | 23-62 | 43 | 2 |
| 2 | 41-195 | 123 | 19-81 | 39 | 4 |
| 3 | | | | | 0 |
| Área: Patrón de Lineamientos 16 | | | | | |
| Orden | Rango de longitud del eje mayor (m) | Longitud media del eje mayor (m) | Rango de longitud del eje menor (m) | Longitud media del eje menor (m) | N |
| 0 | 33-147 | 92 | 18-95 | 54 | 6 |
| 1 | 30-304 | 161 | 17-70 | 41 | 12 |
| 2 | 101-538 | 223 | 34-127 | 72 | 16 |
| 3 | 394 | 394 | 177 | 177 | 1 |
| Área: Patrón de Lineamientos 17 | | | | | |
| Orden | Rango de longitud del eje mayor (m) | Longitud media del eje mayor (m) | Rango de longitud del eje menor (m) | Longitud media del eje menor (m) | N |
| 0 | | | | | 0 |
| 1 | 136 | 136 | 36 | 36 | 1 |
| 2 | | | | | 0 |
| 3 | | | | | 0 |
| Área: Patrón de Lineamientos 18 | | | | | |
| Orden | Rango de longitud del eje mayor (m) | Longitud media del eje mayor (m) | Rango de longitud del eje menor (m) | Longitud media del eje menor (m) | N |
| 0 | 55-216 | 136 | 32-132 | 82 | 2 |
| 1 | 34-231 | 149 | 27-122 | 61 | 14 |
| 2 | 66-563 | 318 | 20-137 | 78 | 13 |
| 3 | 2194 | 2194 | 187 | 187 | 1 |
| Área: Patrón de Lineamientos 19 | | | | | |
| Orden | Rango de longitud del eje mayor (m) | Longitud media del eje mayor (m) | Rango de longitud del eje menor (m) | Longitud media del eje menor (m) | N |
| 0 | 37-93 | 65 | 21-24 | 23 | 2 |
| 1 | 39-271 | 142 | 12-88 | 44 | 12 |
| 2 | 79-419 | 212 | 27-171 | 75 | 16 |
| 3 | 262-290 | 276 | 62-148 | 105 | 2 |

Tabla 34. Informe morfométrico de las depresiones kársticas de los 4 tipos de patrón de lineamientos (agrupados)

| Área: Tipo de Patrón de Lineamientos Paralelos | | | | | |
|--|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|----|
| Orden | Rango de longitud del eje mayor (m) | Longitud media del eje mayor (m) | Rango de longitud del eje menor (m) | Longitud media del eje menor (m) | N |
| 0 | 29-216 | 73 | 18-132 | 47 | 6 |
| 1 | 25-574 | 183 | 15-274 | 75 | 56 |
| 2 | 41-921 | 274 | 19-255 | 86 | 50 |
| 3 | 203-2194 | 696 | 65-187 | 119 | 8 |
| Área: Tipo de Patrón de Lineamientos Entrecruzados | | | | | |
| Orden | Rango de longitud del eje mayor (m) | Longitud media del eje mayor (m) | Rango de longitud del eje menor (m) | Longitud media del eje menor (m) | N |
| 0 | 33-147 | 88 | 18-95 | 47 | 15 |
| 1 | 30-839 | 178 | 12-160 | 67 | 77 |
| 2 | 79-673 | 235 | 27-171 | 77 | 63 |
| 3 | 239-1042 | 455 | 62-177 | 119 | 7 |
| Área: Tipo de Patrón de Lineamientos Dendrítico | | | | | |
| Orden | Rango de longitud del eje mayor (m) | Longitud media del eje mayor (m) | Rango de longitud del eje menor (m) | Longitud media del eje menor (m) | N |
| 0 | | | | | 0 |
| 1 | 136 | 136 | 36 | 36 | 1 |
| 2 | 64-273 | 161 | 19-120 | 60 | 4 |
| 3 | 549 | 549 | 176 | 176 | 1 |
| Área: Tipo de Patrón de Lineamientos Aislados | | | | | |
| Orden | Rango de longitud del eje mayor (m) | Longitud media del eje mayor (m) | Rango de longitud del eje menor (m) | Longitud media del eje menor (m) | N |
| 0 | | | | | 0 |
| 1 | 148 | 148 | 69 | 69 | 1 |
| 2 | | | | | 0 |
| 3 | | | | | 0 |

Es notable que en la muestra de depresiones cerradas del PEST, la magnitud y proporción de éstas se incrementa cuasi linealmente en función de su orden (**Tabla 32**). Esta es una característica muy común en los paisajes kársticos tropicales. La coalescencia¹²³ de dolinas a través de la evolución del karst resulta en el crecimiento paulatino de las mismas, sumando las proporciones de origen. Asimismo, los rangos de longitud de los ejes mayor y menor dejan en claro la gran variabilidad dimensional de las depresiones kársticas del PEST (**Tabla 32**).

Respecto a los tipos de patrón de lineamientos, es evidente que las depresiones de los patrones paralelos son grandes y alargadas, mientras que las de los patrones entrecruzados son, en general, menos grandes y menos alargadas. Las depresiones de los patrones dendríticos y aislados son escasas y de dimensión variable, lo que muy probablemente se deba al contexto kárstico en el que se sitúan (**Tabla 33**) (**Tabla 34**).

¹²³ Propiedad de las cosas de unirse o fundirse (Real Academia Española, 2011).

3.3.5 MORFOMETRÍA Y ANÁLISIS DE COLINAS KÁRSTICAS RESIDUALES

En contraparte de los lineamientos y depresiones kársticas se encuentran las colinas kársticas residuales. El estudio de estas unidades geomorfológicas tiene la finalidad de caracterizar los rasgos positivos mayores del relieve kárstico. El análisis de caracteres espaciales como la densidad; y caracteres morfométricos como la pendiente, *aspecto geomorfológico* (dirección de la pendiente), altura y anchura, contribuye también, en la caracterización y discriminación espacial de los distintos paisajes kársticos.

La extracción de colinas kársticas residuales se realizó a partir de un Mapa Altimétrico Vectorial con curvas de nivel cada 10m., generado de un Modelo Digital de Elevación tipo Nube de Puntos, construido a partir del Modelo Digital de Elevación LIDAR Tipo Terreno de INEGI, con resolución de 5m. (E15D21D2, E15D21D4, E15D21E3, E15D21E4, E15D21F1, E15D21F2, E15D21F3, E15D21F4, E15D22D3, E15D31B1, E15D31B2, E15D31B3, E15D31B4, E15D31C1, E15D31C2, E15D31C3, E15D31C4). El marco de trabajo considera el área kárstica del PEST y zona de influencia. La extracción, realizada sobre la plataforma digital de ArcGIS 10, constó de cuatro pasos:

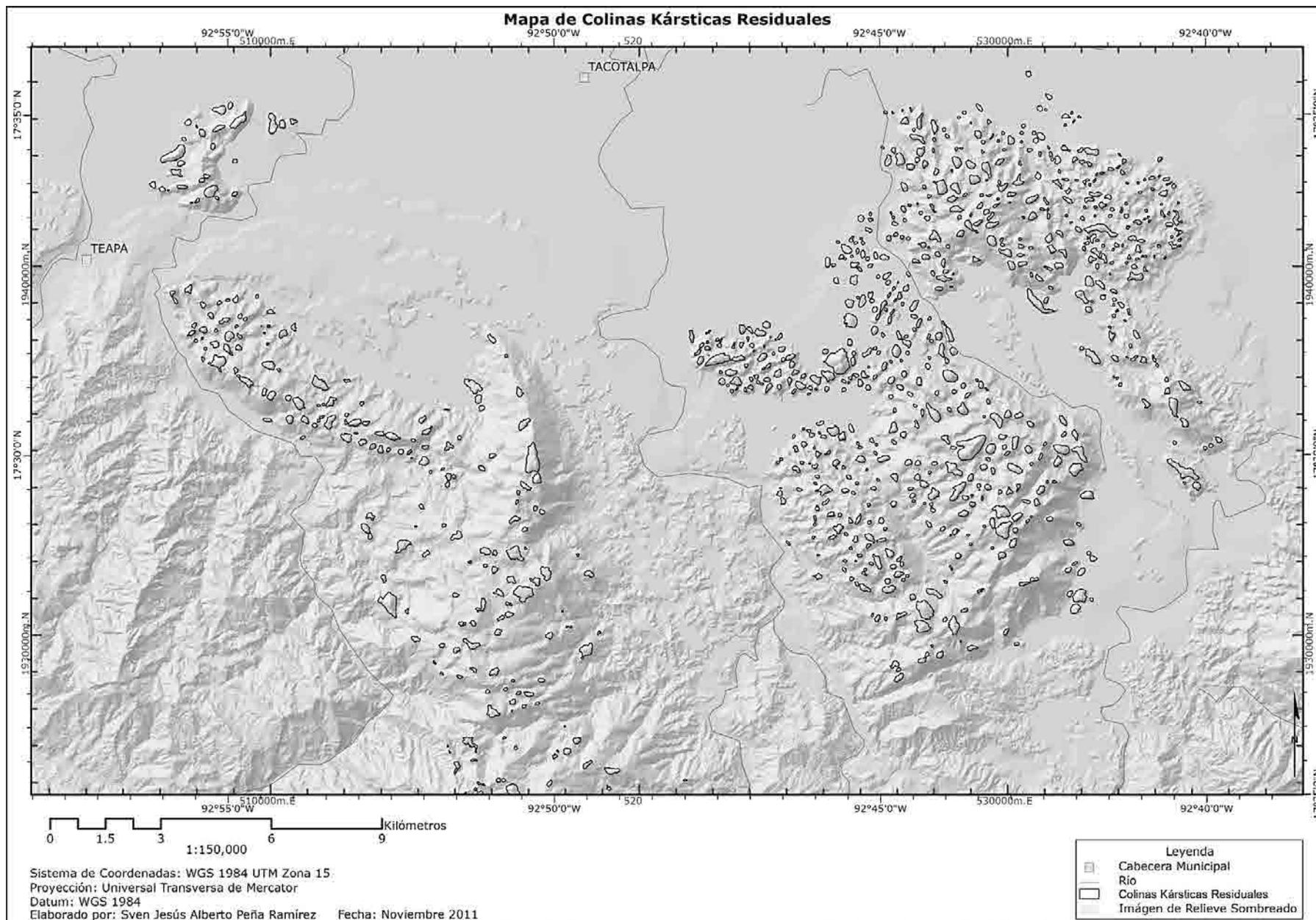
1. Selección de depresiones y colinas kársticas residuales de una o dos simas o cimas, respectivamente, y eliminación de curvas de nivel externas.
2. Eliminación de depresiones kársticas. Esto se realizó bajo el análisis simultáneo de curvas de nivel e interpretación visual del MDE en tercera dimensión desplegado en ArcScene 10.
3. Selección de colinas kársticas residuales de una cima o de dos cimas, siempre y cuando éstas no superen los 10m. de diferencia; y separación de colinas kársticas residuales de dos cimas cuya diferencia supera los 10m¹²⁴. Ha de mencionarse que en el área de los patrones de lineamientos aislados, algunas colinas kársticas de dos cimas (diferencia > 10m.) si fueron integradas a la selección. Esto a discreción de que la expresión morfológica óptima de dichas colinas abarca todo el bloque kárstico hasta la ruptura más evidente de la pendiente, i.e. en el contacto con la planicie de corrosión mas que en el perímetro de la entidad individual (véase **3.3.1.6**).
4. Eliminación de curvas de nivel internas.

Se reconocieron un total de 902 colinas kársticas residuales (**Mapa 22**). Una vez identificadas las colinas, se procedió al análisis de caracteres espacial: densidad; y morfométricos: pendiente, aspecto geomorfológico, altura y anchura.

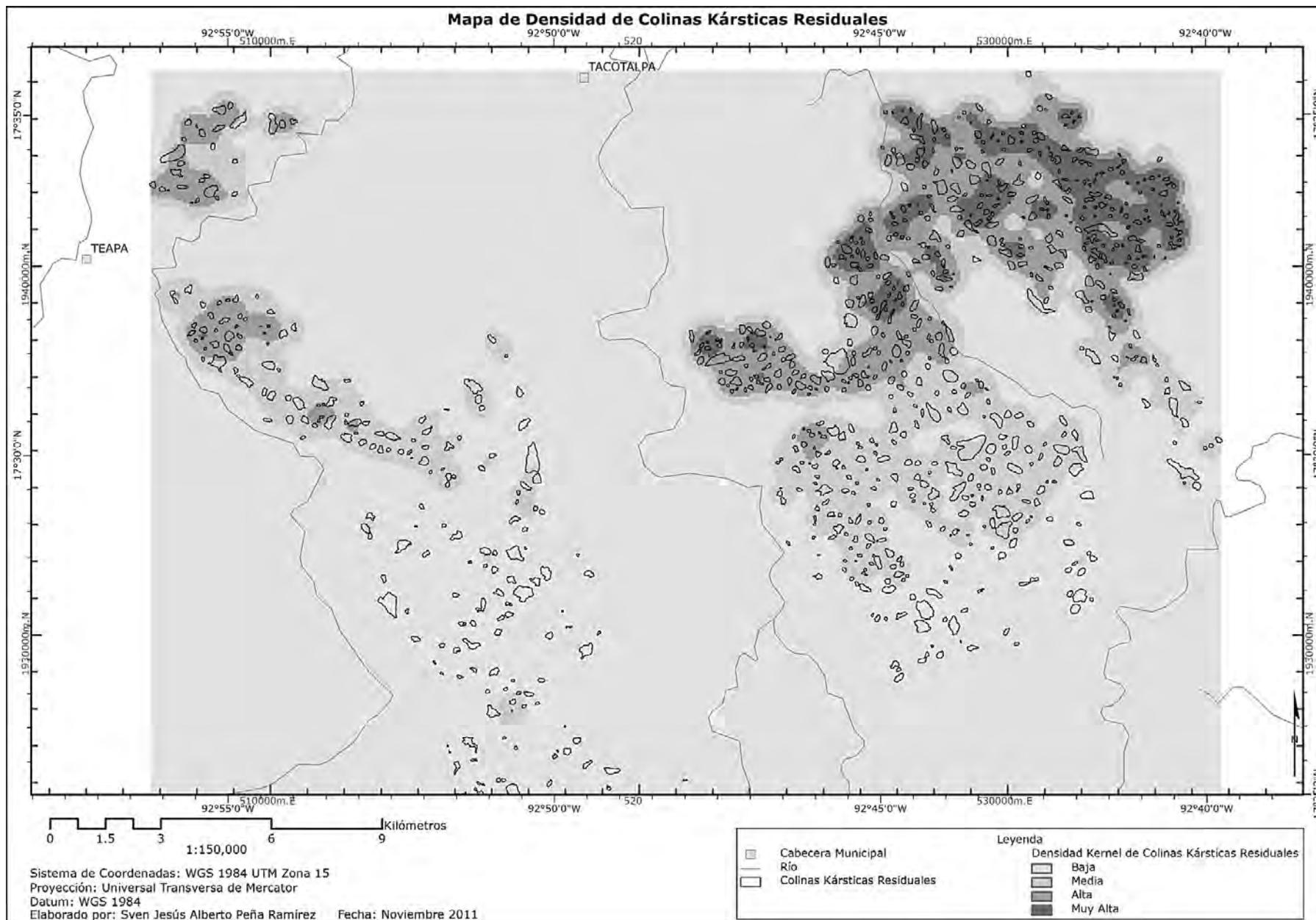
El análisis de densidad de colinas kársticas residuales, al igual que el de depresiones kársticas, requirió de dos tratamientos: la construcción de un Mapa de Densidad de Colinas Kársticas Residuales (**Mapa 23**), el cual fue elaborado bajo el estándar de densidad kernel, expresado en cuatro clases seleccionadas por cortes naturales (jenks), con rangos de 0-800 (Baja), 800-2845 (Media), 2845-5556 (Alta), y 5556-11291 (Muy Alta); y el cálculo de la densidad de colinas kársticas residuales por patrón de lineamientos, dividiendo el número de colinas consideradas por polígono, entre el área correspondiente en Km² (**Tabla 35**) (**Figura 129**). Aquí también fue necesario fragmentar el shapefile original de colinas kársticas residuales en 19 shapefiles correspondientes a los 19 patrones de lineamientos, y 4 shapefiles correspondientes a los 4 tipos de patrón de lineamientos. De igual manera, la selección de colinas para cada polígono implicó entidades totales y/o parciales, no puntuales. En la **Tabla 36** se enlista la densidad de colinas kársticas residuales por tipo de patrón.

Los resultados arrojan que la mayoría de los patrones entrecruzados alojan la mayor densidad de colinas kársticas residuales, seguidos en su conjunto por los aislados, paralelos, y finalmente los dendríticos (**Tabla 35**) (**Figura 129**) (**Mapa 23**). Este hecho es corroborado por los valores de densidad correspondientes a los tipos de patrón de lineamientos (**Tabla 36**).

¹²⁴ A razón de atender la definición del autor respecto a las colinas kársticas residuales de las zonas tropicales (véase **3.3.1.6**).



Mapa 22. Mapa de Colinas Kársticas Residuales



Mapa 23. Mapa de Densidad de Colinas Kársticas Residuales

Tabla 35. Densidad de colinas kársticas residuales por patrón

| Patrón de Lineamientos | Colinas Kársticas Residuales por patrón | Área (Km ²) | Densidad de Colinas Kársticas Residuales |
|------------------------|---|-------------------------|--|
| 1 | 27 | 7.42277644868 | 3.64 |
| 2 | 156 | 68.51816936940 | 2.28 |
| 3 | 13 | 1.22871015975 | 10.58 |
| 4 | 17 | 4.97531635418 | 3.42 |
| 5 | 7 | 2.67499766010 | 2.62 |
| 6 | 9 | 4.27934903346 | 2.10 |
| 7 | 60 | 5.54898488385 | 10.81 |
| 8 | 97 | 12.53325574640 | 7.74 |
| 9 | 118 | 18.22455132600 | 6.47 |
| 10 | 14 | 3.65934856975 | 3.83 |
| 11 | 11 | 1.62243086234 | 6.78 |
| 12 | 108 | 12.34690420180 | 8.75 |
| 13 | 40 | 8.87098545675 | 4.51 |
| 14 | 3 | 0.96962250616 | 3.09 |
| 15 | 12 | 2.76849059925 | 4.33 |
| 16 | 70 | 8.67876423262 | 8.07 |
| 17 | 8 | 4.71389753706 | 1.70 |
| 18 | 111 | 35.77902452850 | 3.10 |
| 19 | 50 | 7.94490693292 | 6.29 |

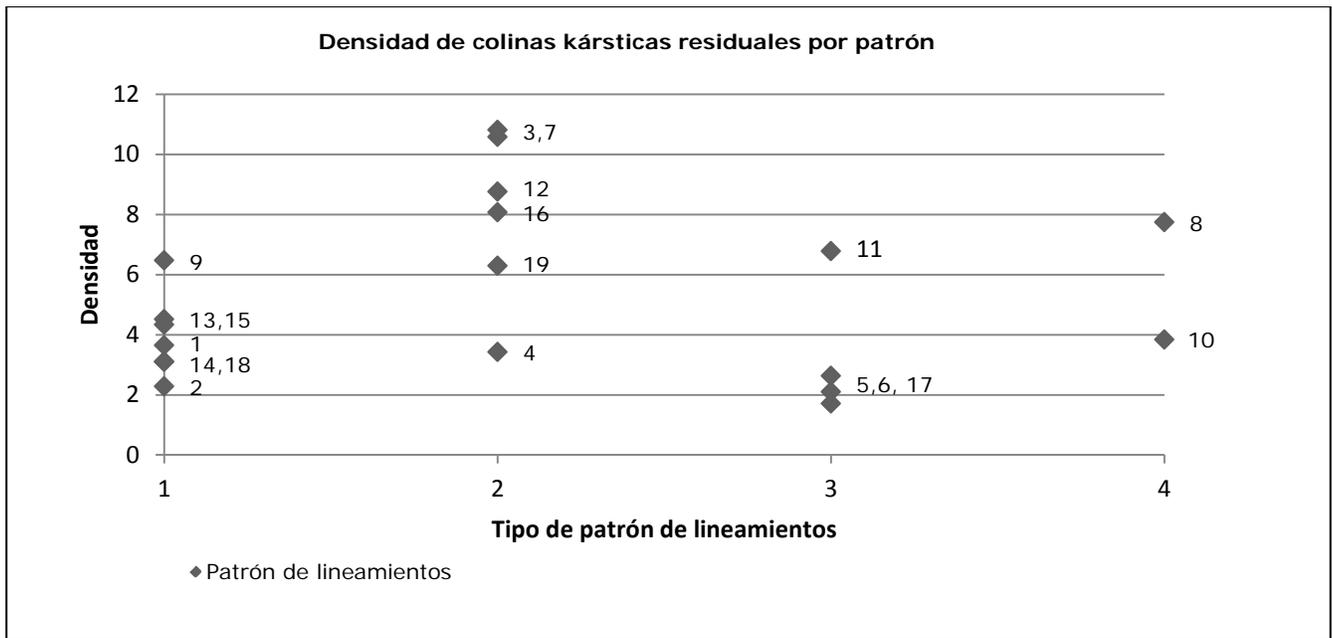


Figura 129. Gráfica de densidad de colinas kársticas residuales por patrón
 1) Paralelos, 2) Entrecruzados, 3) Dendrítico, 4) Aislados

Tabla 36. Densidad de colinas kársticas residuales por tipo de patrón

| Tipo de Patrón de Lineamientos | Colinas Kársticas Residuales por patrón | Área (Km ²) | Densidad de Colinas Kársticas Residuales |
|--------------------------------|---|-------------------------|--|
| Paralelos | 467 | 142.55362023474 | 3.28 |
| Entrecruzados | 318 | 40.72358676512 | 7.81 |
| Dendrítico | 35 | 13.29067509296 | 2.63 |
| Aislados | 111 | 16.19260431615 | 6.85 |

Posteriormente se procedió a realizar el análisis morfométrico de pendiente, aspecto geomorfológico, altura y anchura de las colinas kársticas residuales. Se trata de un método de análisis geométrico diseñado para determinar el tipo de colina kárstica residual, en función de la clasificación de colinas kársticas residuales de las zonas tropicales propuesta por el autor (**Tabla 16**). Este análisis fue realizado en su totalidad sobre la plataforma digital de ArcGIS 10, con una resolución espacial de estudio de 5m (resolución máxima del Modelo Digital de Elevación LIDAR

Tipo Terreno de INEGI). Para ello se requirió la elaboración de 3 Mapas: Altimétrico Vectorial con curvas de nivel cada 5m; de Pendientes, con rangos de 0 a 40°, 40 a 60° y 60 a 90° (**Mapa 24**); y de Aspecto Geomorfológico, el cual considera 4 caras: Norte, Este, Sur y Oeste (**Mapa 25**); y 2 Modelos Digitales de Elevación tipo Red de Triángulos Irregulares con resolución de 5m.: del Parque Estatal de la Sierra de Tabasco y zona de influencia, y de las Colinas Kársticas Residuales seleccionadas. Los 5 productos fueron generados de un Modelo Digital de Elevación tipo Nube de Puntos, construido a partir del Modelo Digital de Elevación LIDAR Tipo Terreno de INEGI, con resolución de 5m.

A continuación se muestra la clave de determinación de colinas kársticas residuales de las zonas tropicales (Peña Ramírez, 2012).

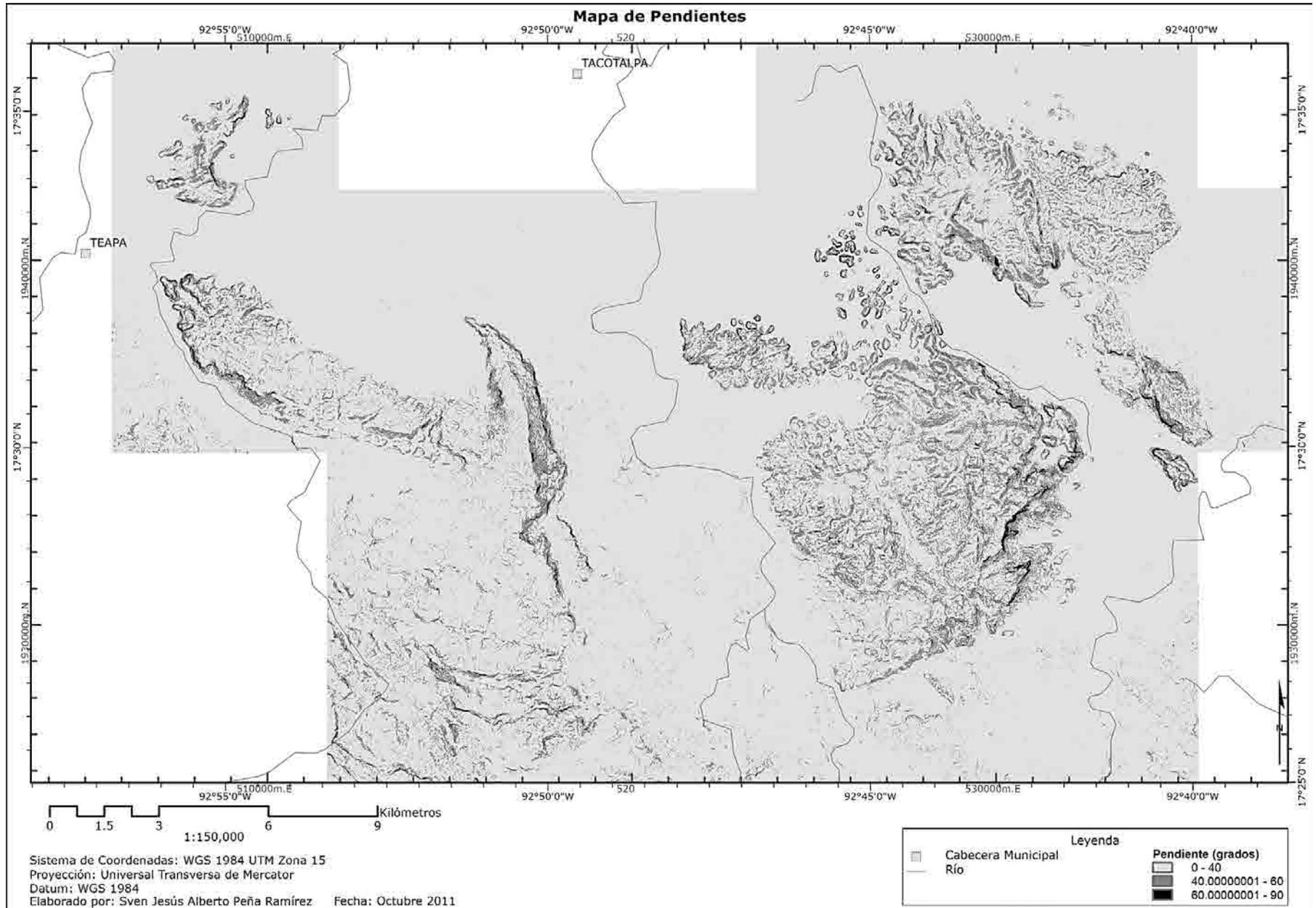
| | | | |
|----|----|---|--------|
| 1. | a. | Pendiente menor a 60° presente en las 4 caras..... | 2 |
| | b. | Pendiente mayor a 60° presente íntegramente en al menos 1 cara, y parcialmente en al menos 2 caras..... | 3 |
| 2. | a. | Pendiente irregular en más de 2 caras, con cima aplanada y/o bases con pendiente mayor a 60°..... | Cúpula |
| | b. | Pendiente regular en más de 2 caras..... | Cono |
| 3. | a. | Altura menor que la anchura..... | Mogote |
| | b. | Altura mayor que la anchura..... | Torre |

Es necesario aclarar que para su diseño se consideraron los siguientes puntos:

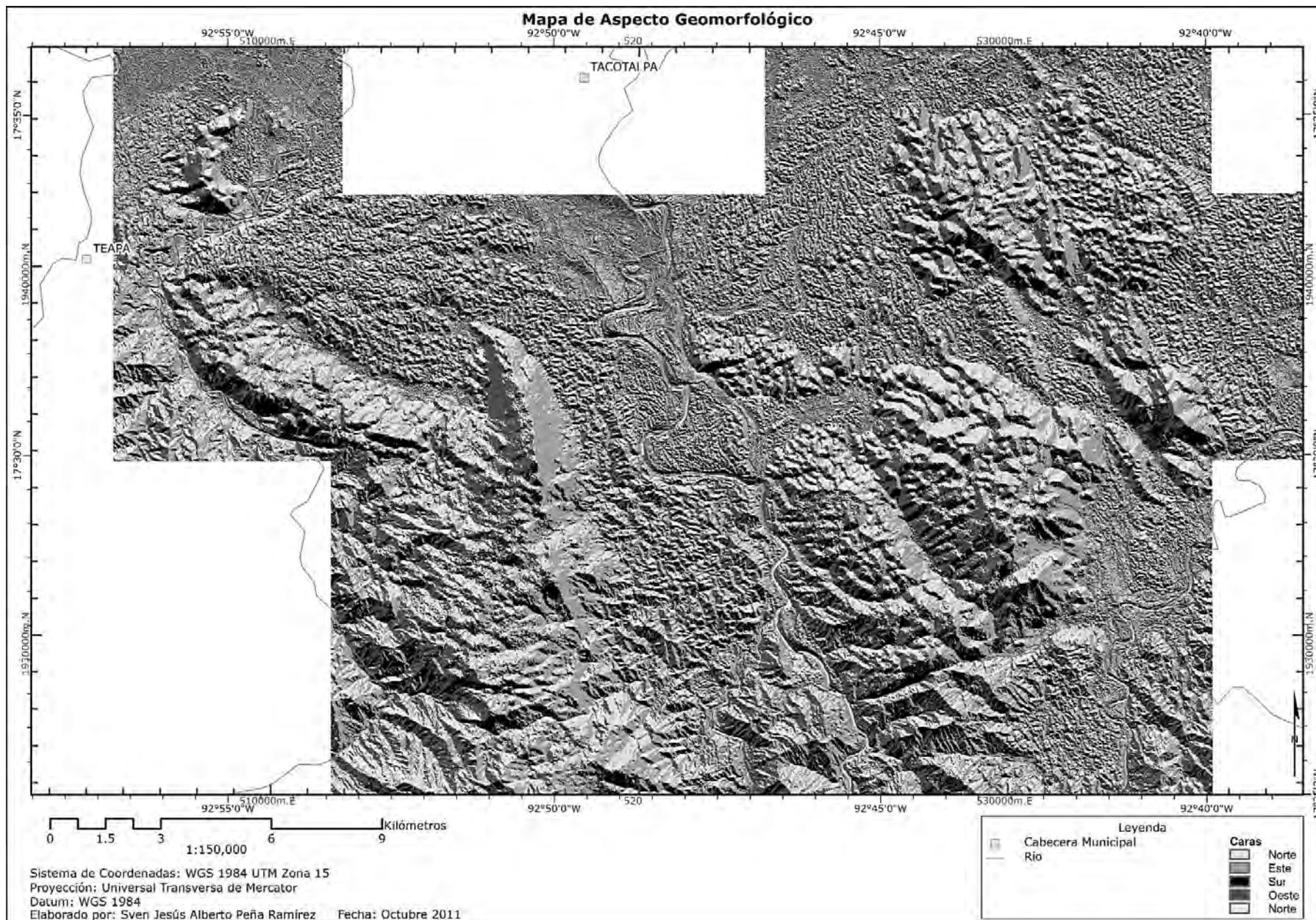
- Se considera que el error espacial del MDE LIDAR es de +-10m., 5m. de error de resolución y 5m. de error por factor vertical. Este último tiene que ver con la representación ambigua de la vertical en aquellas laderas con pendiente de 90° o muy cercano a esta. Dicho error es comprobado en la verificación de campo (véase **3.3.6.3**).
- La altura corresponde a la distancia vertical de la colina respecto a la ruptura de pendiente más evidente. Ruptura que en el karst residual corresponde, en la mayoría de los casos, con la planicie de corrosión.
- La anchura corresponde al eje menor de la colina, dispuesto perpendicularmente al eje mayor, el cual, en la mayoría de los casos, se relaciona con la orientación del fracturamiento regional.

La determinación de colinas kársticas residuales implicó la interpretación visual y cálculo morfométrico (**Apéndice 2**) a través de dos despliegues espaciales: una superposición 2D de los Mapas Altimétrico Vectorial, de Pendientes, de Aspecto Geomorfológico y de Colinas Kársticas Residuales (desplegado en ArcMap) (**Figura 130**); y una superposición 3D de los Modelos Digitales de Elevación tipo Red de Triángulos Irregulares del Parque Estatal de la Sierra de Tabasco y zona de influencia, y de las Colinas Kársticas Residuales seleccionadas (desplegado en ArcScene) (**Figura 131**) (Peña Ramírez, 2012). Así, de las 902 colinas kársticas residuales se diferenciaron 58 cúpulas, 805 conos, 25 mogotes y 14 torres (**Mapa 26**).

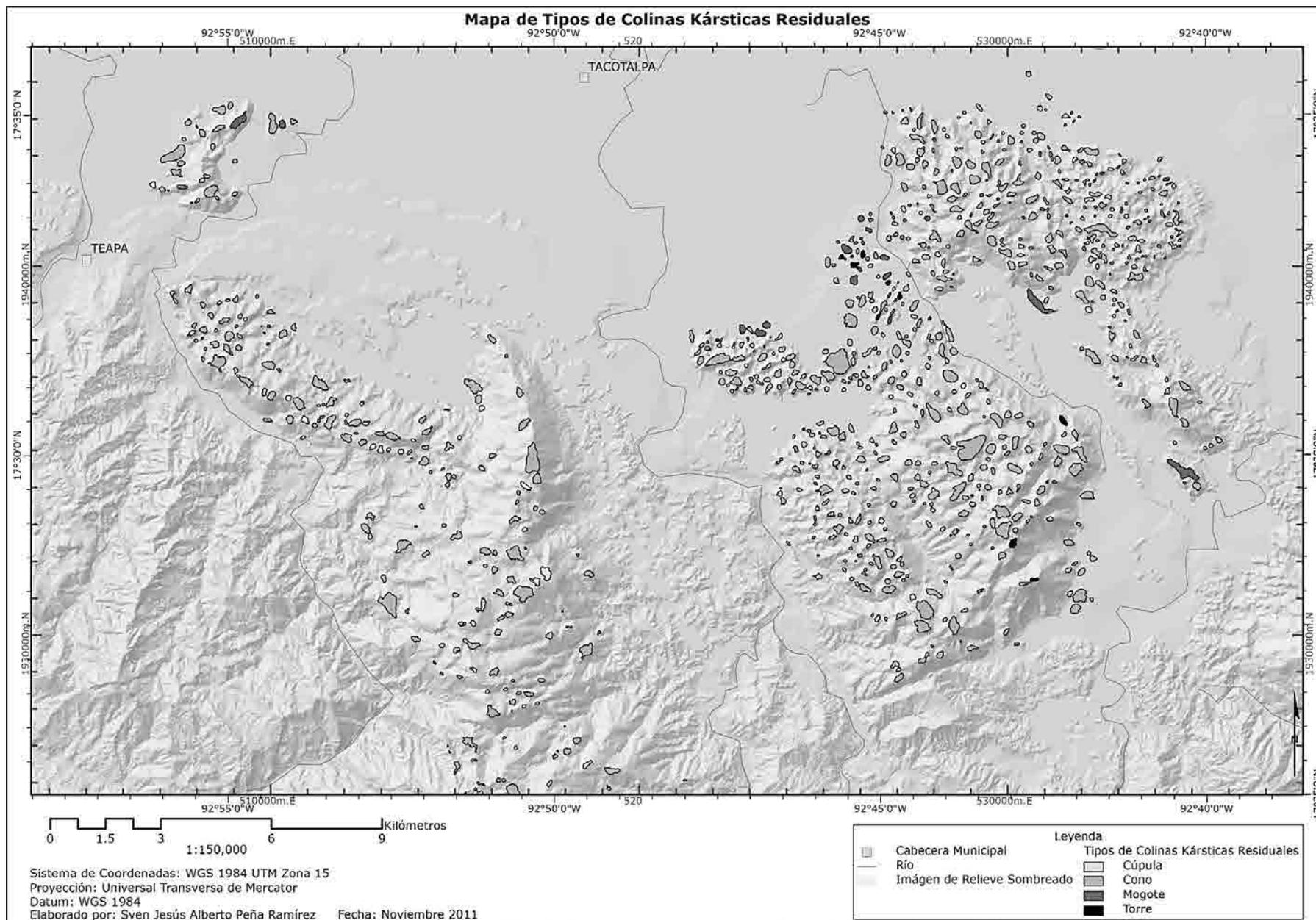
Las **Tablas 37, 38 y 39** contienen el informe morfométrico de las colinas kársticas residuales del PEST, de los 19 patrones de lineamientos, y de los 4 tipos de patrón de lineamientos (agrupados). Los rangos de altura y alturas medias del PEST, ponen en evidencia la superioridad dimensional (en general) del grupo de los mogotes y torres, frente al de las cúpulas y conos (**Tabla 37**) (**Tabla 38**). Siendo así las cúpulas las que presentan la menor altura promedio (19m), superadas por los conos (29m), éstos a su vez por los mogotes (96m) y todos ellos por las torres (229m) (**Tabla 37**). En los cuatro tipos de patrón de lineamientos, es claro que los rangos de altura y promedios de los cuatro tipos de colinas kársticas residuales se mantienen casi constantes (**Tabla 39**).



Mapa 24. Mapa de Pendientes



Mapa 25. Mapa de Aspecto Geomorfológico



Mapa 26. Mapa de Tipos de Colinas Kársticas Residuales

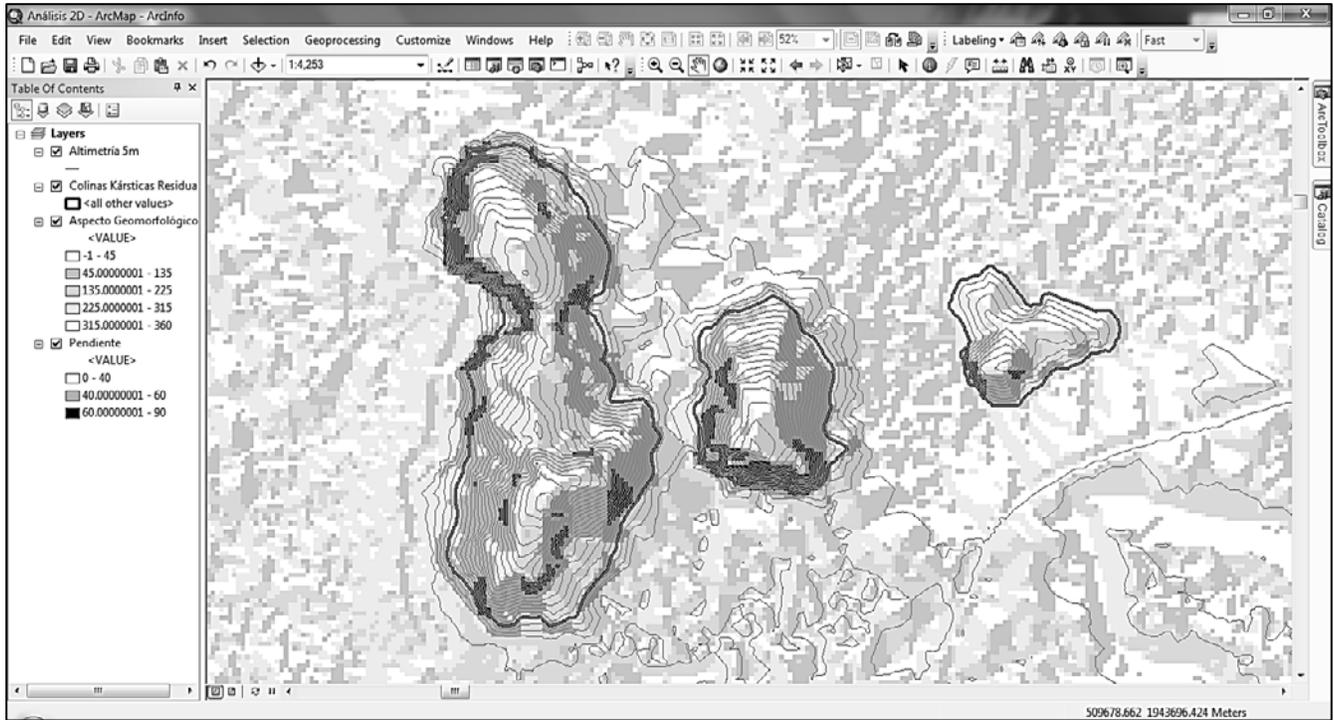


Figura 130. Muestra de superposición 2D

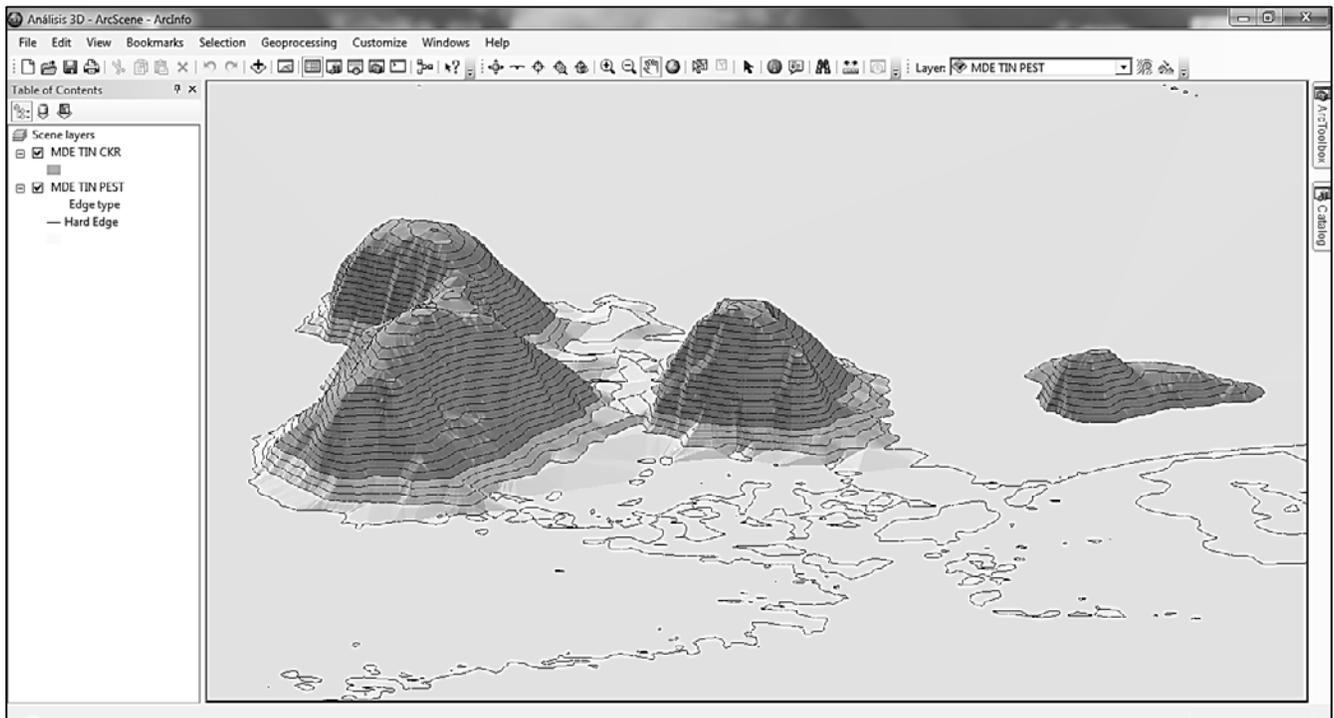


Figura 131. Muestra de superposición 3D

Tabla 37. Informe morfométrico de las colinas kársticas residuales del Parque Estatal de la Sierra de Tabasco

| Área: Parque Estatal de la Sierra de Tabasco | | | |
|--|---------------------|------------------|--------|
| Tipo de colina kárstica residual | Rango de altura (m) | Altura media (m) | N |
| Cúpula | 5-50 | | 18 58 |
| Cono | 5-180 | | 30 805 |
| Mogote | 40-155 | | 93 25 |
| Torre | 50-325 | | 146 14 |

Tabla 38. Informe morfométrico de las Colinas kársticas residuales de los 19 patrones de lineamientos

| Área: Patrón de Lineamientos 1 | | | |
|----------------------------------|---------------------|------------------|-------|
| Tipo de colina kárstica residual | Rango de altura (m) | Altura media (m) | N |
| Cúpula | 35 | | 35 1 |
| Cono | 10-110 | | 42 24 |
| Mogote | 80-100 | | 90 2 |
| Torre | | | 0 |

| Área: Patrón de Lineamientos 2 | | | |
|----------------------------------|---------------------|------------------|--------|
| Tipo de colina kárstica residual | Rango de altura (m) | Altura media (m) | N |
| Cúpula | 10-50 | | 18 18 |
| Cono | 5-115 | | 25 138 |
| Mogote | | | 0 |
| Torre | | | 0 |

| Área: Patrón de Lineamientos 3 | | | |
|----------------------------------|---------------------|------------------|-------|
| Tipo de colina kárstica residual | Rango de altura (m) | Altura media (m) | N |
| Cúpula | 10-35 | | 23 2 |
| Cono | 10-65 | | 33 11 |
| Mogote | | | 0 |
| Torre | | | 0 |

| Área: Patrón de Lineamientos 4 | | | |
|----------------------------------|---------------------|------------------|-------|
| Tipo de colina kárstica residual | Rango de altura (m) | Altura media (m) | N |
| Cúpula | 5-30 | | 18 7 |
| Cono | 10-40 | | 23 10 |
| Mogote | | | 0 |
| Torre | | | 0 |

| Área: Patrón de Lineamientos 5 | | | |
|----------------------------------|---------------------|------------------|------|
| Tipo de colina kárstica residual | Rango de altura (m) | Altura media (m) | N |
| Cúpula | 10 | | 10 1 |
| Cono | 10-35 | | 18 6 |
| Mogote | | | 0 |
| Torre | | | 0 |

| Área: Patrón de Lineamientos 6 | | | |
|----------------------------------|---------------------|------------------|------|
| Tipo de colina kárstica residual | Rango de altura (m) | Altura media (m) | N |
| Cúpula | | | 0 |
| Cono | 10-45 | | 23 9 |
| Mogote | | | 0 |
| Torre | | | 0 |

| Área: Patrón de Lineamientos 7 | | | |
|----------------------------------|---------------------|------------------|-------|
| Tipo de colina kárstica residual | Rango de altura (m) | Altura media (m) | N |
| Cúpula | 10-20 | | 14 8 |
| Cono | 10-80 | | 35 47 |
| Mogote | 80-125 | | 107 5 |
| Torre | | | 0 |

| Área: Patrón de Lineamientos 8 | | | |
|----------------------------------|---------------------|------------------|-------|
| Tipo de colina kárstica residual | Rango de altura (m) | Altura media (m) | N |
| Cúpula | | | 0 |
| Cono | 10-180 | | 42 76 |
| Mogote | 60-125 | | 86 12 |
| Torre | 50-165 | | 112 9 |

| Área: Patrón de Lineamientos 9 | | | |
|----------------------------------|---------------------|------------------|--------|
| Tipo de colina kárstica residual | Rango de altura (m) | Altura media (m) | N |
| Cúpula | 10-40 | | 20 3 |
| Cono | 5-95 | | 32 111 |
| Mogote | 40-155 | | 88 4 |
| Torre | | | 0 |

| Área: Patrón de Lineamientos 10 | | | |
|----------------------------------|---------------------|------------------|-----|
| Tipo de colina kárstica residual | Rango de altura (m) | Altura media (m) | N |
| Cúpula | | | 0 |
| Cono | 10-60 | 32 | 14 |
| Mogote | | | 0 |
| Torre | | | 0 |
| Área: Patrón de Lineamientos 11 | | | |
| Tipo de colina kárstica residual | Rango de altura (m) | Altura media (m) | N |
| Cúpula | | | 0 |
| Cono | 15-70 | 32 | 11 |
| Mogote | | | 0 |
| Torre | | | 0 |
| Área: Patrón de Lineamientos 12 | | | |
| Tipo de colina kárstica residual | Rango de altura (m) | Altura media (m) | N |
| Cúpula | 10-30 | 16 | 11 |
| Cono | 10-80 | 23 | 95 |
| Mogote | 90 | 90 | 1 |
| Torre | 120 | 120 | 1 |
| Área: Patrón de Lineamientos 13 | | | |
| Tipo de colina kárstica residual | Rango de altura (m) | Altura media (m) | N |
| Cúpula | 30 | 30 | 1 |
| Cono | 5-85 | 28 | 39 |
| Mogote | | | 0 |
| Torre | | | 0 |
| Área: Patrón de Lineamientos 14 | | | |
| Tipo de colina kárstica residual | Rango de altura (m) | Altura media (m) | N |
| Cúpula | | | 0 |
| Cono | 10-55 | 33 | 2 |
| Mogote | 145 | 145 | 1 |
| Torre | | | 0 |
| Área: Patrón de Lineamientos 15 | | | |
| Tipo de colina kárstica residual | Rango de altura (m) | Altura media (m) | N |
| Cúpula | | | 0 |
| Cono | 10-30 | 17 | 12 |
| Mogote | | | 0 |
| Torre | | | 0 |
| Área: Patrón de Lineamientos 16 | | | |
| Tipo de colina kárstica residual | Rango de altura (m) | Altura media (m) | N |
| Cúpula | 20 | 20 | 1 |
| Cono | 10-70 | 26 | 69 |
| Mogote | | | 0 |
| Torre | | | 0 |
| Área: Patrón de Lineamientos 17 | | | |
| Tipo de colina kárstica residual | Rango de altura (m) | Altura media (m) | N |
| Cúpula | 20-30 | 25 | 2 |
| Cono | 10-60 | 25 | 6 |
| Mogote | | | 0 |
| Torre | | | 0 |
| Área: Patrón de Lineamientos 18 | | | |
| Tipo de colina kárstica residual | Rango de altura (m) | Altura media (m) | N |
| Cúpula | 10-25 | 18 | 5 |
| Cono | 10-130 | 30 | 102 |
| Mogote | | | 0 |
| Torre | 105-325 | 229 | 4 |
| Área: Patrón de Lineamientos 19 | | | |
| Tipo de colina kárstica residual | Rango de altura (m) | Altura media (m) | N |
| Cúpula | | | 0 |
| Cono | 10-110 | 37 | 49 |
| Mogote | | | 0 |
| Torre | 325 | 325 | 1 |

Tabla 39. Informe morfométrico de las colinas kársticas residuales de los 4 tipos de patrón de lineamientos (agrupados)

| Área: Tipo de Patrón de Lineamientos Paralelos | | | |
|--|---------------------|------------------|--------|
| Tipo de colina kárstica residual | Rango de altura (m) | Altura media (m) | N |
| Cúpula | 10-50 | | 19 28 |
| Cono | 5-130 | | 29 428 |
| Mogote | 40-155 | | 96 7 |
| Torre | 105-325 | | 229 4 |
| Área: Tipo de Patrón de Lineamientos Entrecruzados | | | |
| Tipo de colina kárstica residual | Rango de altura (m) | Altura media (m) | N |
| Cúpula | 5-35 | | 17 29 |
| Cono | 10-110 | | 28 281 |
| Mogote | 80-125 | | 104 6 |
| Torre | 120-325 | | 223 2 |
| Área: Tipo de Patrón de Lineamientos Dendrítico | | | |
| Tipo de colina kárstica residual | Rango de altura (m) | Altura media (m) | N |
| Cúpula | 10-30 | | 20 3 |
| Cono | 10-70 | | 26 32 |
| Mogote | | | 0 |
| Torre | | | 0 |
| Área: Tipo de Patrón de Lineamientos Aislados | | | |
| Tipo de colina kárstica residual | Rango de altura (m) | Altura media (m) | N |
| Cúpula | | | 0 |
| Cono | 10-180 | | 40 90 |
| Mogote | 60-125 | | 86 12 |
| Torre | 50-165 | | 112 9 |

En la **Figura 132** se muestra una gráfica del número de colinas kársticas residuales del PEST en función de su tipo. Las gráficas correspondientes a los 19 patrones de lineamientos se presentan en la **Figura 133**, las correspondientes a los 4 tipos de patrón de lineamientos (agrupados) en la **Figura 134**.

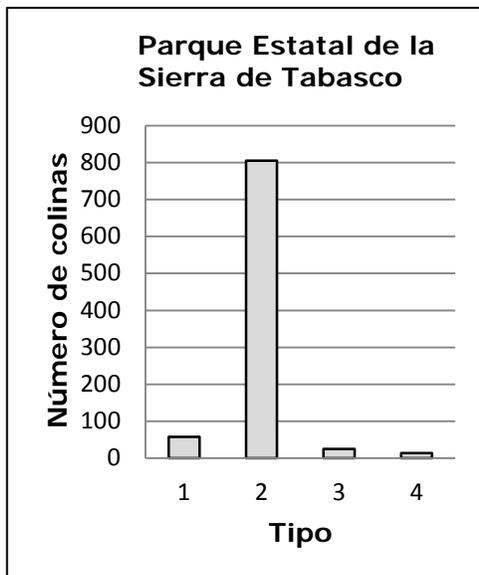


Figura 132. Número de colinas kársticas residuales del PEST en función de su tipo
 1) Cúpulas, 2) Conos, 3) Mogotes, 4) Torres

Los datos referentes al PEST muestran que la gran mayoría de las colinas kársticas residuales son cónicas (805), seguidas en número por las cúpulas (58), mogotes (25), y torres (14) (**Tabla 37**) (**Figura 132**). Dicha distribución de datos coincide en proporción con las del tipo de patrón de lineamientos paralelos, entrecruzados y aislados.

Llama la atención que mientras el número de conos, presentes en los tipos de patrones paralelos y entrecruzados, son proporcionales al área de los polígonos, las cúpulas, mogotes y torres mantienen casi el mismo número de presencias en ambos grupos (**Figura 134**). Por otro lado, es notorio que mientras el grupo de los patrones paralelos y entrecruzados presentan los cuatro tipos de colinas kársticas residuales, el grupo de los dendríticos carece de mogotes y torres, y el de los aislados de cúpulas (**Figura 134**).

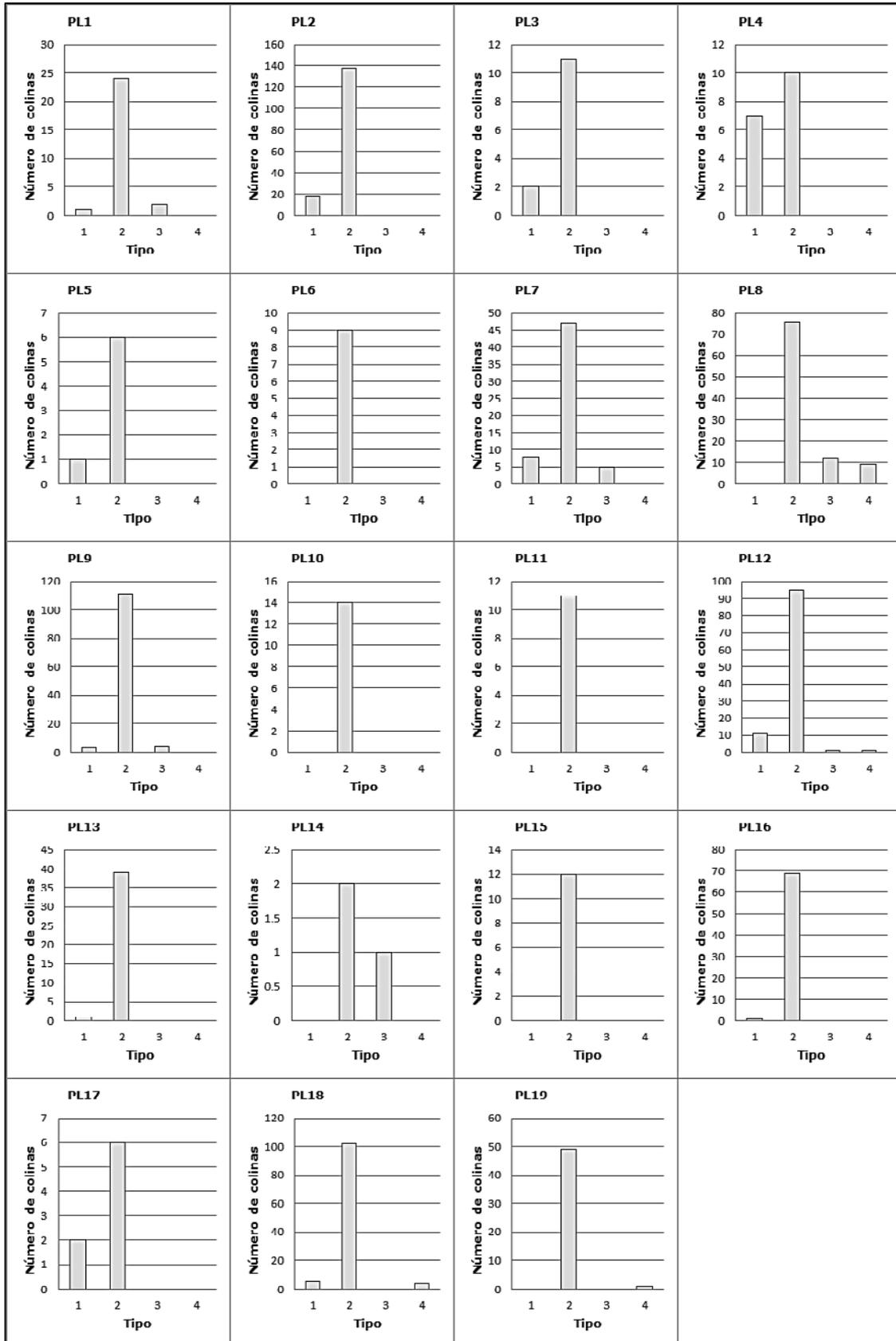


Figura 133. Número de colinas kársticas residuales en función de su tipo para los de los 19 patrones de lineamientos

1) Cúpulas, 2) Conos, 3) Mogotes, 4) Torres

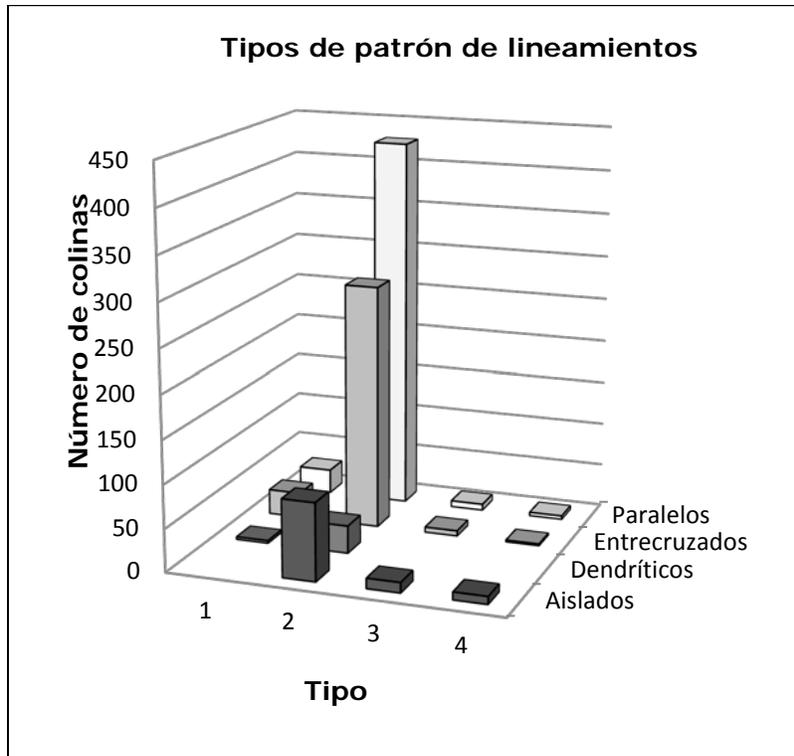


Figura 134. Número de colinas kársticas residuales en función de su tipo para los 4 tipos de patrón de lineamientos (agrupados)
 1) Cúpulas, 2) Conos, 3) Mogotes, 4) Torres

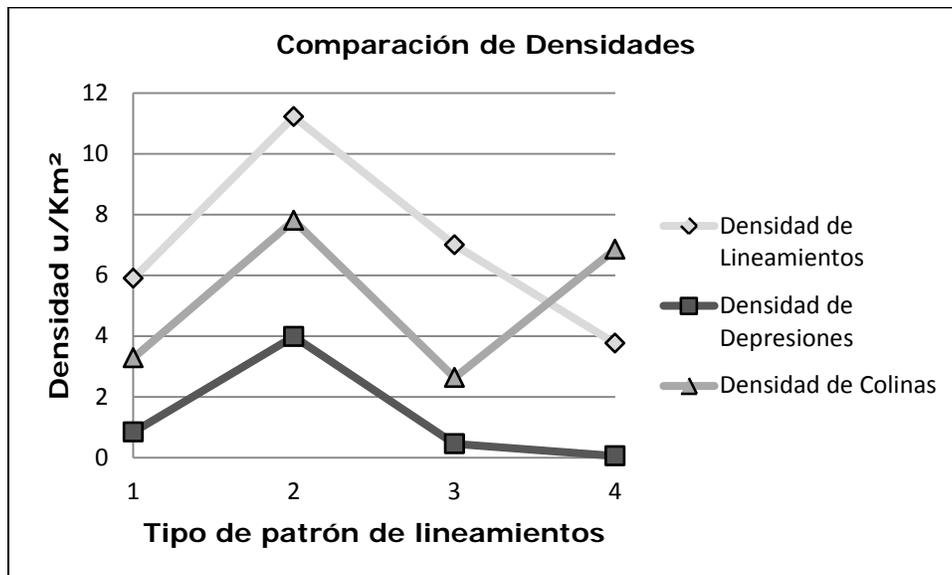


Figura 135. Comparación de densidades de lineamientos, depresiones y colinas kársticas residuales por tipo de patrón de lineamientos
 1) Paralelos, 2) Entrecruzados, 3) Dendrítico, 4) Aislados

Finalmente, ha de resaltarse la importancia del criterio de densidad en la discriminación de patrones espaciales, tanto en el análisis de lineamientos, como en el de depresiones y colinas kársticas residuales. Su comparación gráfica (Figura 135) permite emitir importantes conclusiones preliminares acerca de sus interrelaciones. Los patrones paralelos y dendríticos, por su propia configuración geométrica, carecen de intersecciones lineales (de alineamientos), lo que reduce la presencia de depresiones kársticas y, por consecuencia, la de colinas kársticas

residuales. En el mismo axioma, el sesgo en cantidad de lineamientos que presentan los patrones dendríticos, se debe propiamente a la configuración arborescente, la que posibilita una mayor concentración de lineamientos sin establecer intersecciones. En los patrones entrecruzados, la relación entre la densidad de lineamientos, depresiones y colinas es proporcional. La gran cantidad de intersecciones posibilita la presencia de depresiones y colinas kársticas residuales. Finalmente, los valores de densidad que presentan los patrones aislados corresponden ampliamente con su naturaleza evolutiva. La baja densidad de lineamientos y depresiones kársticas habla de un sistema kárstico joven o viejo, el cual se diferencia y especifica por la presencia o ausencia de colinas kársticas residuales y por la posición del nivel base de disolución.

3.3.6 MUESTREO Y VERIFICACIÓN DE CAMPO

En estudios de geografía ambiental, como en muchos otros, el trabajo de campo es de suma importancia para su consolidación. De esta manera, y atendiendo a las condiciones climáticas del área de estudio, accesibilidad y secuencia de desarrollo del trabajo de investigación, la verificación de campo se realizó en el mes de Junio del 2011 con las siguientes características:

3.3.6.1 ITINERARIO

El trabajo de campo se realizó del 20 al 28 de Junio del 2011 llevando a cabo las siguientes actividades (**Tabla 40**):

Tabla 40. Itinerario del Trabajo de Campo

| Junio 2011 | Actividades |
|--------------|--|
| Lunes 20 | Salida a Villahermosa, Tabasco |
| Martes 21 | Visita a la Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental Registro de actividades a realizarse dentro del Parque Estatal de la Sierra de Tabasco |
| Miércoles 22 | Visita al H. Ayuntamiento de Teapa Transecto al noreste de la estructura Coconá |
| Jueves 23 | Visita general al PEST Visita a la Estación Biológica "La Florida" en Villa Tapijulapa, Tacotalpa Visita al Monumento Natural "Grutas del Cerro Coconá". |
| Viernes 24 | Adecuación y planificación de transectos representativos en el PEST |
| Sábado 25 | Transecto al sureste de Pochitocal y alrededores de Lomas Alegres |
| Domingo 26 | Transecto al este de Estación Poaná |
| Lunes 27 | Transecto en Ejido Poaná |
| Martes 28 | Regreso a la Ciudad de México |

3.3.6.2 LOGÍSTICA PRÁCTICA Y ADMINISTRATIVA

La verificación de campo correspondiente a la investigación documental se centró principalmente en la observación, identificación macroscópica, medición, muestreo y registro de los elementos más representativos del paisaje kárstico, previamente seleccionados en gabinete. El número de transectos trabajados, así como su localización, fueron determinados de acuerdo a la accesibilidad en campo, y a los recursos temporales y económicos asignados a la investigación.

Para tal propósito se diseñó una serie de hojas de registro de datos, se recabó el material de campo necesario (véase **3.1.1**) se realizó el cálculo presupuestal, así como el contacto con las autoridades administrativas del Parque Estatal de la Sierra de Tabasco y Monumento Natural Grutas del Cerro Coconá.

El permiso para el acceso y realización de actividades académicas dentro del PEST fue solicitado a la Ocean. Silvia Whizar Lugo, Titular de la Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental del Estado de Tabasco, y subsecuentemente al Biól. Perfecto Alcudia García, Jefe del Departamento de Áreas Naturales Protegidas de la Subsecretaría de Desarrollo Sustentable. El apoyo institucional, práctico y orientativo estuvo a cargo de Perfecto Alcudia, Benigno Domínguez, Jaime Valente, Armando González, Carlos Esquivel y Saúl Herrera.

3.3.6.3 SITIOS Y VARIABLES DE MUESTREO Y VERIFICACIÓN

En las **Tablas 41, 42 y 43** se muestran los sitios seleccionados para el muestreo, verificación y observación de campo, respectivamente, así como los distintos parámetros registrados.

Tabla 41. Sitios y variables de muestreo litológico

| Junio 2011 | Coordenadas | Localidad | Muestra | Tipo de roca | Intemperismo | Azimut | Echado | Estratificación | Ancho del estrato | Estructuras menores | Fósiles |
|------------|--|--|---------|-------------------|--------------|--------|--------|-----------------|-------------------|----------------------|---------|
| 22 | 17°34'48.9"N 92°54'13.8"W 44 msnm | 1.4 Km al SWW de la Piscifactora José Narciso Rovirosa | M1 | Caliza | No | 240° | 57°NW | Media | 0.5 a 3m | Karren | No |
| 23 | 17°26'34.3"N 92°45'31.4"W 111 msnm | Kolem Chen 2.84 Km al SE de Tapijulapa | M2 | Caliza | Si | 178° | 55°SW | Media | 0.5 a 3m | Karren | No |
| 23 | 17°26'34.4"N 92°45'31.3"W 115 msnm | Kolem Chen 2.84 Km al SE de Tapijulapa | M3 | Depósito calcáreo | - | - | - | - | - | Espeleotemas | No |
| 23 | 17°33'50.4"N 92°55'41.9"W 43 msnm | Grutas del Cerro Coconá, 2.47 Km al NEE de Teapa | M4 | Dolomía | No | 354° | 20°NW | Fina | 0.1 a 1m | Espeleotemas | No |
| 25 | 17°35'22.4"N 92°41'27.4"W 31 msnm | 1.6 Km al NEE de Lomas Alegres Tercera Sección | M5 | Lutita calcárea | No | 19° | 35°SE | Muy fina | - | Campo de lapiaz | No |
| 26 | 17°34'46.2"N 92°44'04.7"W 74 msnm | 1.74 Km al NEE de Estación Poaná | M6 | Caliza | Si | 49° | 75°SE | Fina | 0.05 a 1m | Karren | No |
| 26 | 17°34'50.2"N 92°44'04.8"W 72 msnm | 1.75 Km al NEE de Estación Poaná | M7 | Caliza | No | 312° | 25°SW | Media | 0.5 a 1.5m | Karren Terra rosa | No |
| 27 | 17°32'01.5"N 92°44'14.4"W 36 msnm | 1.96 Km al SE de Poaná | M8 | Caliza | No | - | - | Masiva | 3 a 5m | Costras calcáreas | No |
| 27 | 17°32'01.5"N 92°44'14.4"W 36 msnm | 1.96 Km al SE de Poaná | M9 | Caliza | No | 301° | 14°NE | Masiva | 3 a 5m | Costras calcáreas | Si |

Tabla 42. Sitios y variables de verificación

| Junio 2011 | Coordenadas | Localidad | Verificación | Lineamientos | Colinas kársticas residuales | Ángulo a la cima | Ángulo a la base | Altura al ojo del observador | Distancia en el mapa | Altura cálculo/morfometría |
|------------|---|--|--------------|--|-----------------------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| 22 | 17°34'48.9"N 92°54'13.8"W 44 msnm | 1.4 Km al SWW de la Piscifactora José Narciso Rovirosa | V1 | 006 NNW-SSE | 877Mogote 886 Cono | 27° 33° | 0° 0° | 1.58 | 156m 150m | 81/80m 99/95m |
| 22 | 17°34'09.0"N 92°54'20.9"W 24 msnm | 2.23 Km al NE de Eureka y Belén | V2 | 000 NE-SW 007 NEE-SWW 011 NNE-SSW 106 NWW-SEE | 803 Cono | 13° | 12° | 1.58 | 1582m | 57/35m |
| 25 | 17°36'22.5"N 92°43'20.7"W 26 msnm | 3.04 Km al SSE de Pochitocal Primera Sección | V3 | 385 NNW-SSE 394 NNW-SSE 396 NNW-SSE 428 NE-SW 429 NE-SW 430 NEE-SWW | 790 Cono 830 Cono | 6° 5° | 5° 4° | 1.58m | 4790m 4029m | 85/70m 72/65m |
| 25 | 17°34'49.6"N 92°40'50"W 39 msnm | 2.39 Km al SEE de Lomas Alegres Tercera Sección | V4 | 527 NE-SW 573 NNW-SSE | 802 Torre 828 Cono | 6° 6° | 1° 3° | 1.58m | 1378m 904m | 122/120m 49/55m |
| 25 | 17°33'37.9"N 92°39'49.1"W 43 msnm | Lomas Alegres Cuarta Sección | V5 | 574 NE-SW 577 NEE-SWW | 731 Cono | 12° | 9° | 1.58m | 1090m | 59/45m |
| 26 | 17°34'46.0"N 92°44'04.6"W 72 msnm | 1.74 Km al NEE de Estación Poaná | V6 | 394 NNE-SSE 395 NW-SE | 790 Cono 830 Cono 856 Cono | 15° 18° 24° | 12° 14° 21° | 1.58m | 1539m 982m 287m | 82/70m 70/65m 17/15m |
| 27 | 17°32'05.3"N 92°44'12.5"W 35 msnm | 1.91 Km al SE de Poaná | V7 | 727 NNW-SSE 739 NNE-SSW 753 N-S | 520 Cono 551 Torre 553 Cono | 7° 19° 6° | 0° 0° 0° | 1.58m | 651m 151m 439m | 81/75m 54/50m 48/45m |

Tabla 43. Sitios y variables de observación del paisaje

| Junio 2011 | Coordenadas | Localidad | Observación | Drenaje/corrientes | Orientación del flujo hídrico | Valles inundables | pH/tem | Grado de karstificación | Erosión | | Grado de conservación forestal |
|------------|--|--|-------------|-------------------------------------|-------------------------------|---|--------|-------------------------|----------|------------|--------------------------------|
| | | | | | | | | | vertical | horizontal | |
| 22 | 17°34'45.9"N 92°54'06.4"W 23 msnm | 1.26 Km al SWW de la Piscificadora José Narciso Rovirosa | O1 | Orientado Intermitente Torrencial | SE | Drenaje encajonado | 7/31° | Alto | Baja | Alta | Alto (Natural y Cultural) |
| 22 | 17°34'09.0"N 92°54'20.9"W 24 msnm | 2.23 Km al NE de Eureka y Belén | O2 | Meándrico Perenne | NE | - | - | Alto | Baja | Alta | Alto (Cultural) |
| 23 | 17°27'46.7"N 92°46'13.1"W 70 msnm | Estación Biológica "La Florida" 0.75 Km al E de Villa Tapijulapa | O3 | Dendrítrico Permanente | NW | Presencia de terrazas de flujo torrencial | 6/27° | Medio | Media | Media | Alto (Restaurada) |
| 23 | 17°26'34.3"N 92°45'31.4"W 111 msnm | Kolem Chen 2.84 Km al SE de Tapijulapa | O4 | Orientado Intermitente | SW | Drenaje encajonado | - | Medio | Media | Media | Alto (Natural) |
| 23 | 17°33'50.5"N 92°55'41.8"W 40 msnm | Grutas del Cerro Coconá, 2.47 Km al NEE de Teapa | O5 | Desordenado Intermitente Torrencial | SW | - | 7/26° | Medio | - | - | - |
| 25 | 17°35'22.4"N 92°41'27.4"W 31 msnm | 1.6 Km al NEE de Lomas Alegres Tercera Sección | O6 | Meándrico Intermitente Torrencial | NE | Presencia de terrazas de flujo torrencial | - | Medio | Media | Media | Medio (Natural y Cultural) |
| 26 | 17°34'46.0"N 92°44'04.6"W 72 msnm | 1.74 Km al NEE de Estación Poaná | O7 | Orientado Torrencial | NW | Presencia de ponores | - | Medio | Media | Media | Alto (Natural y Cultural) |
| 27 | 17°32'05.3"N 92°44'12.5"W 35 msnm | 1.91 Km al SE de Poaná | O8 | Meándrico Intermitente Torrencial | NW | - | - | Alto | Baja | Alta | Alto (Natural y Cultural) |

En la verificación de campo, la orientación de lineamientos fue estimada por observación, mientras que la altura fue calculada por el método trigonométrico que se ilustra en la **Figura 136**. Los ángulos a las cimas y bases de las colinas kársticas residuales fueron determinados mediante el uso del clinómetro (precisión de 1°) (**Figura 137**). Como se muestra en la **Tabla 42**, las alturas calculadas en la verificación de campo exponen magnitudes muy semejantes a las medidas en gabinete.

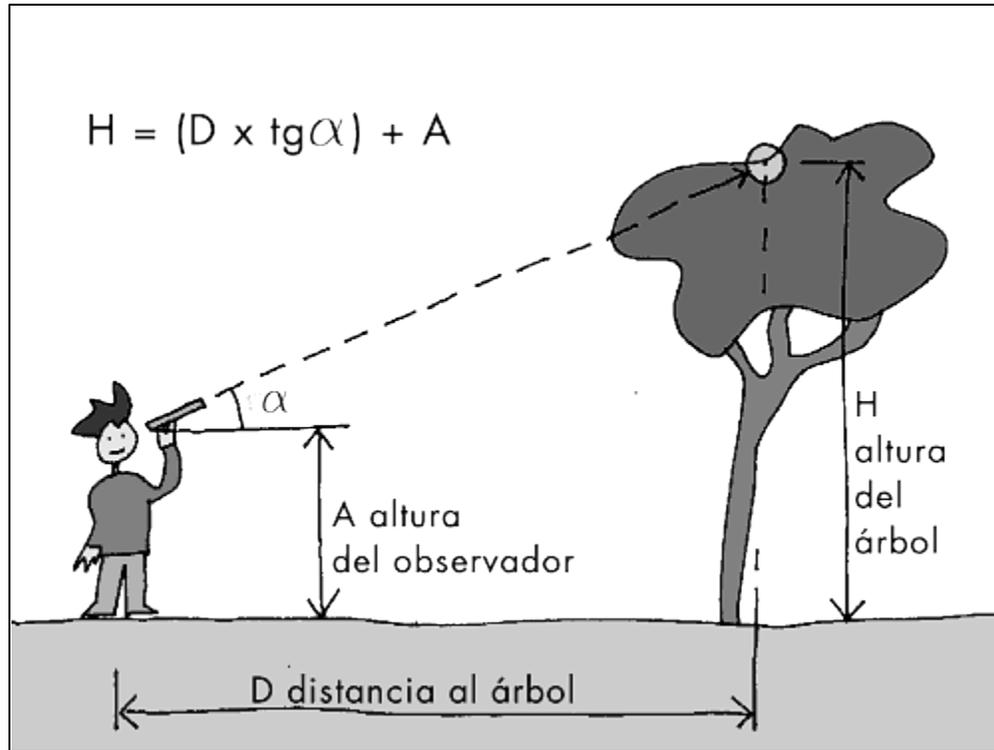


Figura 136. Método trigonométrico para el cálculo de altura
(Instituto Nacional de Tecnologías Educativas y de Formación del Profesorado, 2012)



Figura 137. Cálculo de los ángulos a las cimas y bases de las colinas kársticas residuales
Fotografía de campo

Las categorías del grado de karstificación y erosión fueron determinadas en función de las magnitudes máximas y mínimas observadas en campo. El grado de conservación forestal fue estimado con base en la presencia o ausencia de los distintos estratos arbóreos, el tipo de asociación vegetal e intervención antrópica.

Por otro lado, ha de subrayarse que tras la percepción directa del paisaje kárstico, pudo observarse que las laderas con pendiente de 90° o muy cercano a ésta, se encuentran subestimadas en el Modelo Digital de Elevación LIDAR Tipo Terreno de INEGI (resolución de 5m) (**Figura 138**). Es probable que esto se deba a la densa vegetación de la selva tropical. Esto implicó añadir un error por factor vertical de 5m al MDE LIDAR, así como una corrección a la determinación previa de colinas kársticas residuales (véase 3.3.5).

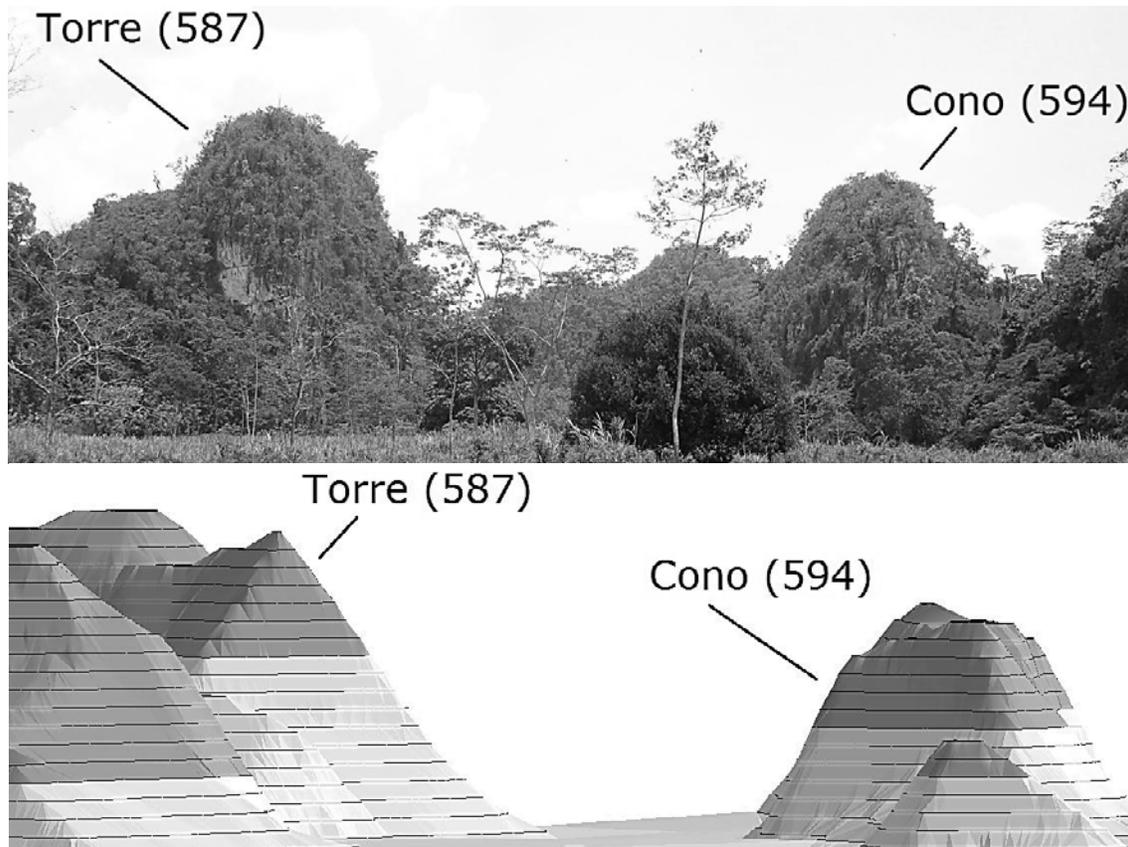


Figura 138. Comparación de fotografía de campo y modelo digital de elevación LIDAR tipo terreno de INEGI
 Nótese el abarrancamiento (90°) que presenta en la fotografía la cara frontal izquierda de la colina kárstica residual No. 587, en comparación con el aspecto cónico de la misma representada en el modelo digital de elevación

Como añadidura al muestreo de campo, y asistido por Armando González, se realizó una prueba experimental in situ (sitio de muestreo 8), cuyo propósito fue el de exponer la cualidad de la roca caliza como depósito natural de dióxido de carbono (NHK Japan Broadcasting Corporation, 1987). El experimento se basó en la reacción química que resulta de añadir ácido clorhídrico al carbonato de calcio contenido en la caliza:



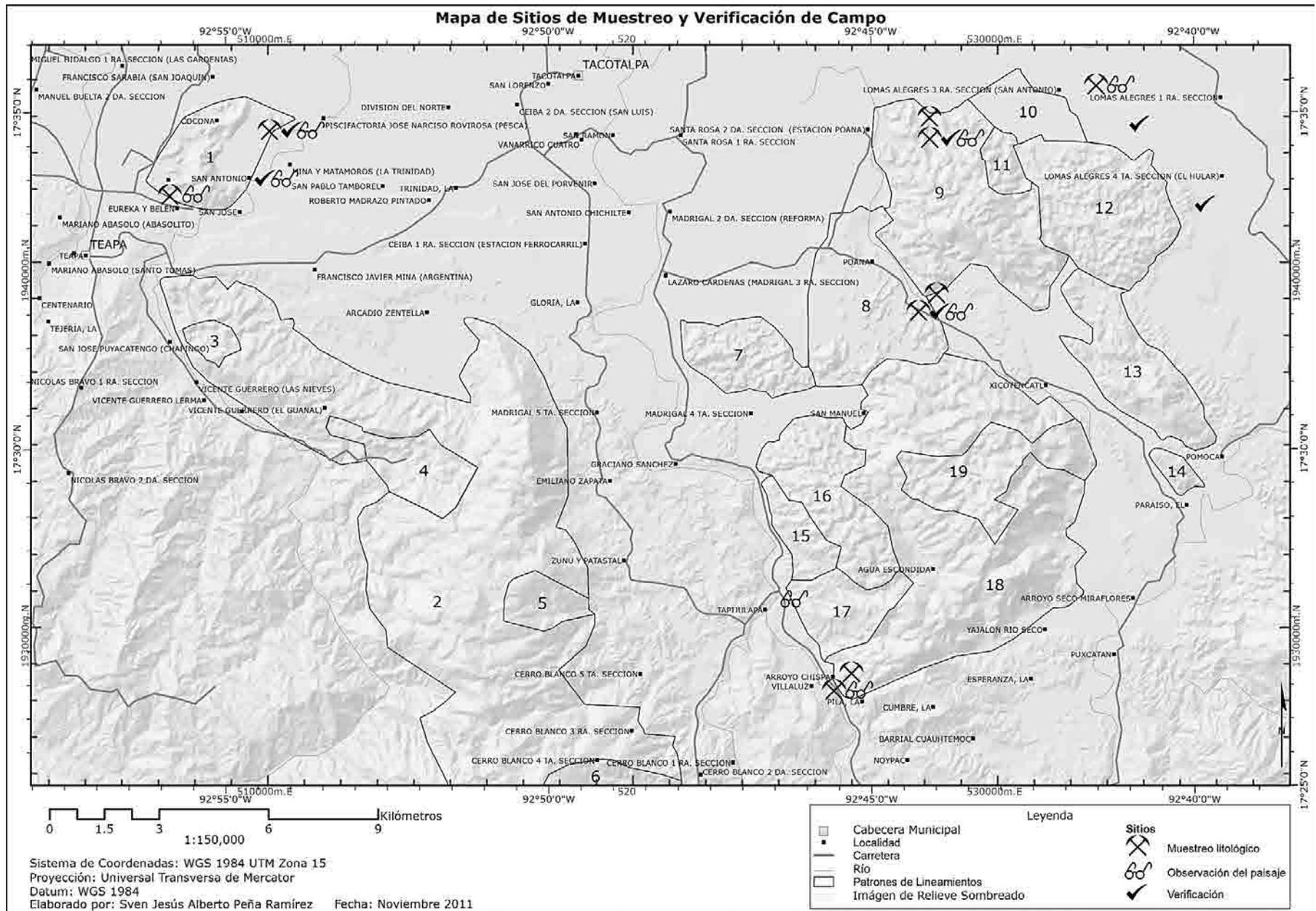
Se trituraron aproximadamente 200cm³ de roca caliza para acelerar la reacción. Dicho volumen fue colocado dentro de una bolsa de plástico a la que posteriormente se le añadieron 60mL de ácido clorhídrico al 10%, justo antes de ser sellada. Así, el gas liberado en la reacción (CO₂) fue almacenado dentro de la bolsa, alcanzando un volumen aproximado de 201cm³. Posteriormente, y en ausencia de corrientes de aire, el dióxido de carbono fue liberado sobre el

fuego de tres velas (previamente fijadas y encendidas), el cual fue sofocado de inmediato. El gas del CO_2 tiene un alto grado de expansión, por lo que al ser aplicado al fuego reduce los niveles de oxígeno en el aire, a un punto en donde la combustión no puede sustentarse. La prueba experimental se ilustra en la **Figura 139**.



Figura 139. Prueba experimental para demostrar el almacenaje natural de dióxido de carbono en roca caliza
Fotografías de campo

El **Mapa 27** muestra la localización de los sitios de muestreo, verificación y observación.



Mapa 27. Mapa de Sitios de Muestreo y Verificación de Campo

3.3.7 ANÁLISIS DE LABORATORIO

Parte fundamental de la investigación fue la evaluación biofísica de las muestras de campo. Con el fin de determinar y caracterizar el material litológico se realizaron 4 análisis, previa limpieza (**Figura 140**): determinación litológica, dureza Schmidt, porosidad, y contenido fósil.



Figura 140. Preparación de las muestras de campo
 Fotografías de laboratorio

3.3.7.1 DETERMINACIÓN LITOLÓGICA

Esta se realizó con base en la caracterización mineralógica de las muestras. Se hizo una observación detallada de los minerales superficiales, del componente fósil y proporción, así como de la velocidad de reacción de cada una de las muestras al ácido clorhídrico, esto para distinguir la presencia de mineral calcita y dolomita (Tarbuck, y otros, 2005) (**Figura 141**). A su vez, se evaluó la dureza en la escala de Mohs (**Figura 142**), el brillo, color, raya y desgaste por intemperismo. La **Tabla 44** enlista las propiedades minerales, determinación litológica de las muestras de campo, y dureza Schmidt (véase **3.3.7.2**). La **Figura 143** ilustra las 9 muestras de campo.



Figura 141. Observación de minerales superficiales y velocidad de reacción al ácido clorhídrico
 Fotografías de laboratorio



Figura 142. Evaluación de dureza en la escala de Mohs
 Fotografías de laboratorio

Izquierda. Prueba con uña de la mano (2.5 en la escala de Mohs). Centro. Prueba con moneda de cobre (3.5 en la escala de Mohs). Derecha. Prueba con clavo (4.5 en la escala de Mohs).

Tabla 44. Propiedades minerales y determinación litológica de las muestras de campo

| Muestra | Mineral | Tipo de Roca | Subtipo calizo | Dureza Mohs | Dureza Schmidt | Brillo | Color | Raya | Intemperismo |
|---------|----------|-------------------|--|-------------|----------------|----------|-------------|--------|--------------|
| M1 | Calcita | Caliza | Mudstone (Dunham, 1962)/Micrita (Folk, 1962) | 3.5 | 24 | Vítreo | Gris oscuro | Blanca | No |
| M2 | Calcita | Caliza | Mudstone (Dunham, 1962)/Micrita (Folk, 1962) | 3.5 | 16.3 | Nacarado | Gris claro | Blanca | Si |
| M3 | - | Depósito calcáreo | - | - | - | - | Gris claro | Blanca | - |
| M4 | Dolomita | Dolomía | - | 3.5 | - | Nacarado | Gris claro | Blanca | No |
| M5 | - | Lutita calcárea | - | 3.5 | 14 | Vítreo | Gris oscuro | Blanca | No |
| M6 | Calcita | Caliza | Mudstone (Dunham, 1962)/Micrita (Folk, 1962) | 3.5 | 13.6 | Vítreo | Gris oscuro | Blanca | Si |
| M7 | Calcita | Caliza | Mudstone (Dunham, 1962)/Micrita (Folk, 1962) | 3.5 | 14 | Vítreo | Gris oscuro | Blanca | No |
| M8 | Calcita | Caliza | Wackestone (Dunham, 1962) | 4 | - | Nacarado | Gris claro | Blanca | No |
| M9 | Calcita | Caliza | Wackestone (Dunham, 1962) | 4 | 19 | Nacarado | Gris claro | Blanca | No |



Figura 143. Muestras de campo
 Fotografías de laboratorio
 Número de muestra de izquierda a derecha, de arriba hacia abajo.

3.3.7.2 DUREZA SCHMIDT

La evaluación de la dureza Schmidt (véase 3.2.1.4) fue realizada en diciembre del 2011, en el Laboratorio de Estructuras y Materiales del Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M. El apoyo institucional, práctico y orientativo estuvo a cargo del Dr. Adalberto Noyola Robles, Director del Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M.; Dr. David Muriá Vila, Coordinador de Estructuras y Materiales; Ing. Abraham Sánchez Ramírez, Responsable del Laboratorio de Estructuras y Materiales; Téc. Admvo. Agustín Muñiz Villegas, Bec. Navani Cadena, y Pas. Lic. en Geografía José Merino.

El instrumento de medición utilizado fue el Esclerómetro de la marca CONTROLS (o martillo Schmidt), modelo Telex 333387 TEST I, número de serie C181N5041M0d. dep (**Figura 144**). La superficie de trabajo seleccionada fue una base de concreto de aproximadamente 30x60cm (**Figura 144**). El procedimiento de medición se basó en el estándar descrito en la guía de determinación del índice de rebote con esclerómetro, publicada por el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC) (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C., 2009), y en el documento de instrucciones de operación del SilverSchmidt & Hammerlink, publicado por Proceq USA, Inc. (Proceq USA, Inc., 2010) (**Figura 145**).

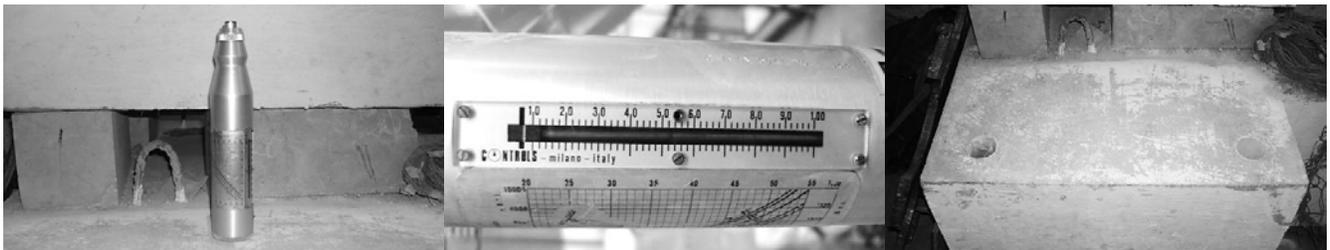


Figura 144. Esclerómetro y superficie de trabajo
 Fotografías de laboratorio

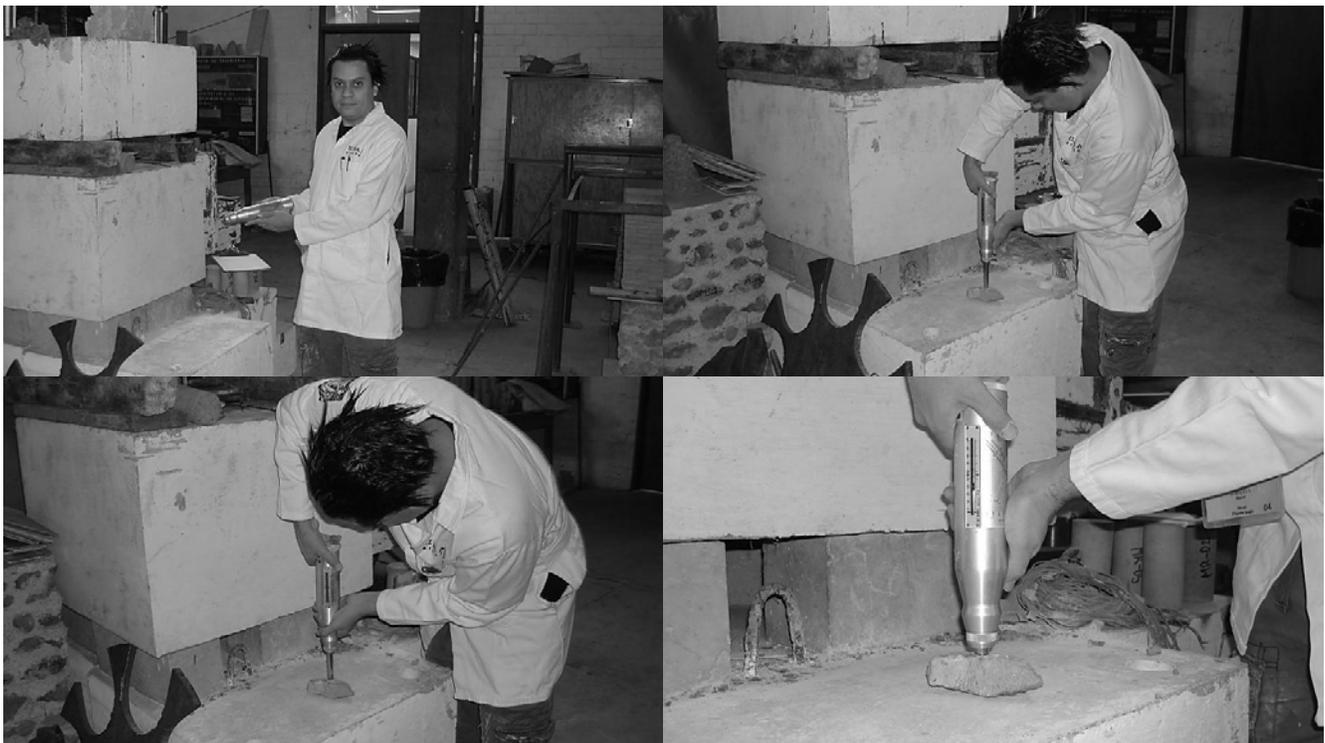


Figura 145. Procedimiento de medición de la dureza Schmidt
 Fotografías de laboratorio

La dureza Schmidt fue calculada a partir del promedio de 9 lecturas aplicadas a cada una de las muestras litológicas, eliminando las lecturas que difirieron del promedio en más de 5 unidades (Proceq USA, Inc., 2010) (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C., 2009) (**Figura 146**). Las pruebas efectuadas en cada muestra sostienen una precisión del 10%. Las muestras 4 y 8 fueron omitidas de la prueba de dureza debido a sus reducidas dimensiones. La dureza media regional Schmidt ha sido determinada en 17.75 para muestras frescas, y 14.95 para muestras intemperizadas.

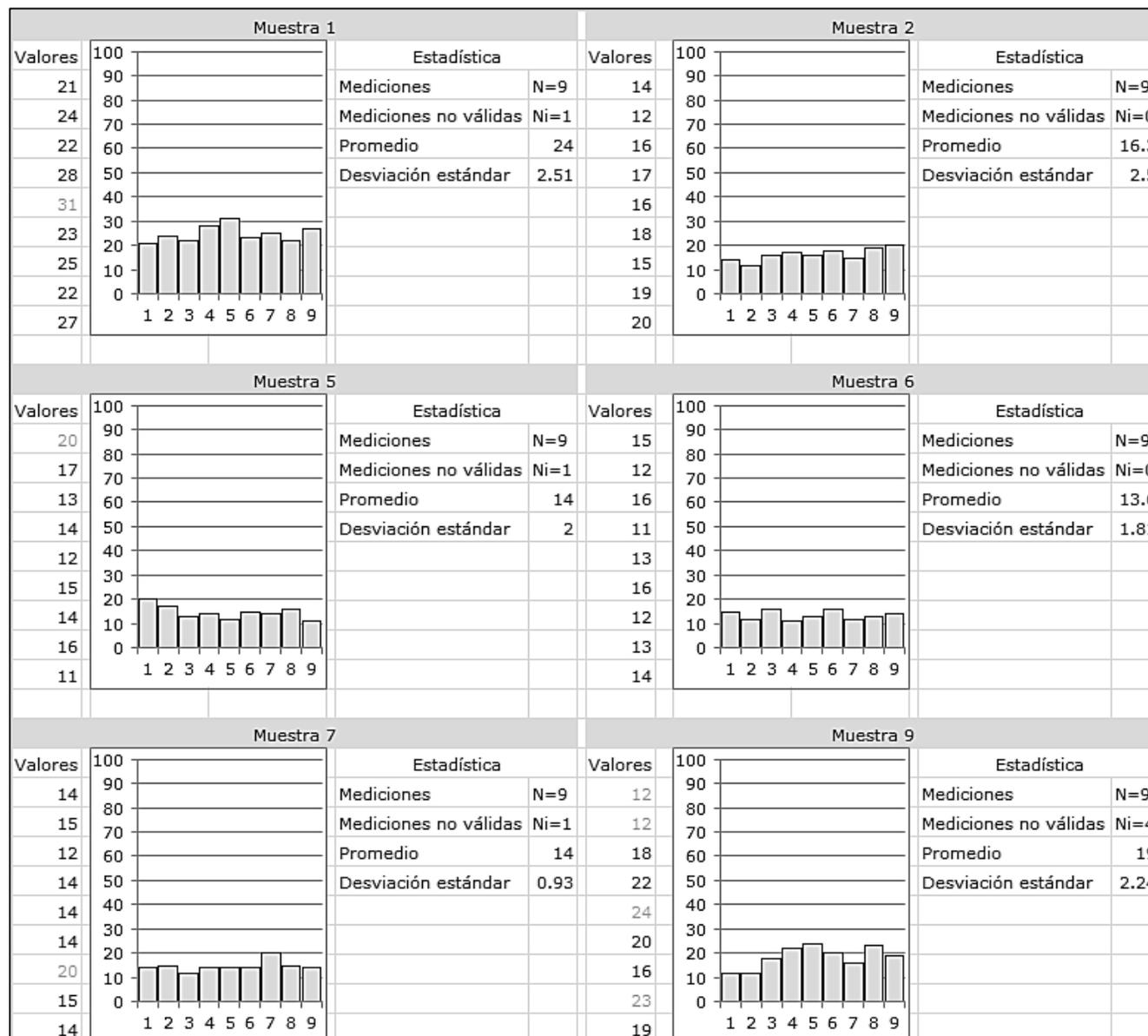


Figura 146. Valores de medición de la dureza Schmidt

3.3.7.3 POROSIDAD

La porosidad de las muestras fue determinada mediante el método gravimétrico de recubrimiento. Este consistió de 4 pasos (La Comunidad Petrolera, 2012) (**Figura 147**):

- 1) Saturación de la muestra e inmersión en el líquido saturante (agua).
- 2) Recubrimiento de la muestra con parafina, secado e inmersión en agua.
- 3) Separación de la cubierta de parafina por ebullición de la muestra en agua.

4) Inmersión de la cubierta de parafina en agua y estimación del desplazamiento líquido.

En los pasos 1,2 y 4 se registró la magnitud desplazada por la muestra en la columna de agua. Previo a cada registro se ajustó y verificó el nivel de agua 0 (500mL), así como la nivelación de la superficie de trabajo (**Figura 147**).



Figura 147. Método gravimétrico de recubrimiento para la determinación de porosidad

El registro de datos y cálculo de la porosidad de las muestras se enlista en la **Tabla 45**. La precisión del método se calculó en 10%. El trabajo fue realizado en marzo del 2012.

Tabla 45. Registro de datos y cálculo de la porosidad

| Muestra | Muestra saturada (mL) | Muestra recubierta (mL) | Cubierta (mL) | Muestra no saturada (mL) | Porosidad (%) |
|---------|-----------------------|-------------------------|---------------|--------------------------|---------------|
| M1 | 20 | 27 | 6 | 21 | 4.8 |
| M2 | 25 | 41 | 12 | 29 | 13.8 |
| M3 | - | - | - | - | - |
| M4 | 6 | 8 | 1 | 7 | 14.3 |
| M5 | 18 | 26 | 6 | 20 | 10 |
| M6 | 18 | 26 | 6 | 20 | 10 |
| M7 | 43 | 58 | 12 | 46 | 6.5 |
| M8 | 2 | 3 | 1 | 2 | 0 |
| M9 | 22 | 28 | 5 | 23 | 4.3 |

3.3.7.4 CONTENIDO FÓSIL

La descripción y determinación del contenido fósil contribuye ampliamente en la caracterización del tipo de roca caliza, el ambiente de depósito que le dio origen, y el desarrollo kárstico. Del material litológico de campo, la muestra 9 presenta los rasgos fósiles más evidentes (**Figura 148**). En ambas secciones se reconocieron fragmentos de gasterópodos y foraminíferos, principalmente (**Tabla 46**).

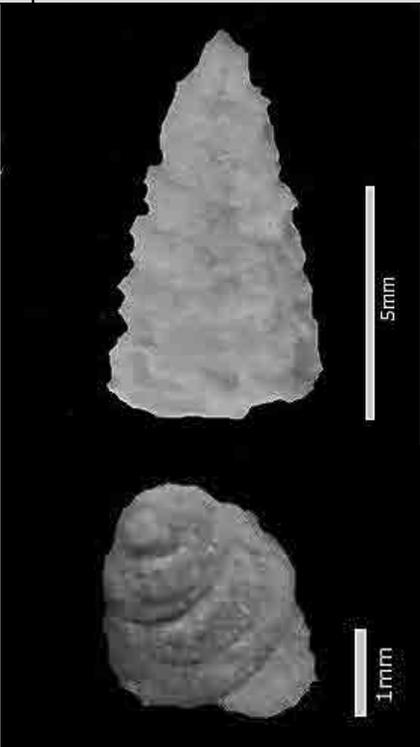
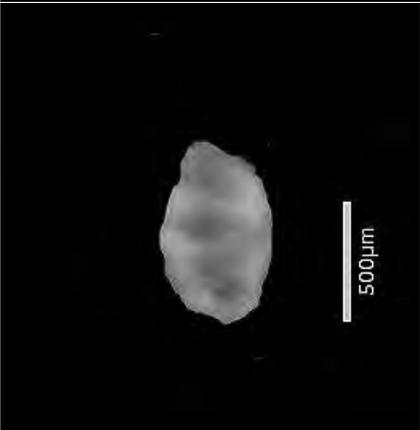


Figura 148. Secciones 1 y 2 de la muestra 9

Los fósiles determinados hablan de biofacies probablemente de tipo Lipostrato-Vital (Schäfer, 1962) y de un ambiente sedimentario tipo marino, de plataforma, y mares someros de terrígenos (Selley, 1976). La fosilización ocurrió muy probablemente por preservación duripártica (García, y otros, 2010).

Tabla 46. Gasterópodos y foraminíferos fósiles del Karst residual cónico Poaná

Elaborada bajo la supervisión del Dr. Pedro García Barrera, Coordinador de la Unidad de Enseñanza de Biología de la Facultad de Ciencias, U.N.A.M., y con base en (The Taxonomicon & Systema Naturae 2000, 2012), (Richter, 1989) e (Izquierdo, 2012)

| Clasificación | | Periodo | Morfología | Hábitat | Especímenes fósiles |
|---|--|--------------------------|--|-----------------------------|---|
| Dominio Reino Phylum Clase Orden Familia | Eukarya Animalia Mollusca Gastropoda Heterobranchia Nerineidae (Zittel, 1873) | Jurásico- Cretácico | Concha esbelta, turriforme-cónica. Las vueltas no se superponen; la sutura suele ser sobresaliente. | Zona de mareas y arrecifes. |  |
| Dominio Reino Phylum Clase Orden Familia | Eukarya Protozoa Protozoa Granuloreticulosea Foraminiferida Miliolidae | Jurásico- Cuaternario | Concha calcárea aporcelanada, cámaras alargadas dispuestas en varios planos alrededor de un eje longitudinal | Cosmopolita |  |

4. RESULTADOS

4.1 CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA Y DETERMINACIÓN TAXONÓMICA DEL PAISAJE KÁRSTICO EN EL PARQUE ESTATAL DE LA SIERRA DE TABASCO

El volumen teórico de la geomorfología kárstica, análisis y discusión de la taxonomía kárstica tropical, aporte de los estudios precedentes, análisis de lineamientos, depresiones kársticas y colinas kársticas residuales, muestreo y verificación de campo, y análisis de laboratorio, juntos, exponen el conocimiento necesario para la caracterización geomorfológica y determinación taxonómica del paisaje kárstico, esto bajo el enfoque de clasificación integral dado por las escuelas karstológica tradicional (D. Ford, P. Williams y W. White) e indonesio-norteamericana (M. Day y E. Haryono) (véase **3.3.1.6**). Expresamente, la caracterización de los tipos de patrones de lineamientos, depresiones kársticas y colinas kársticas residuales asociadas, el sustento de campo y laboratorio, aunado con el conocimiento teórico, posibilitan ahora la determinación del proceso geomorfológico dominante, así como de la o las unidades geomorfológicas dominantes, codominantes y subdominantes.

Aunque varios autores ya han reportado la riqueza geomorfológica del karst tropical en el área de estudio (Gerstenhauer, 1960) (Espinosa Pereña, 1990) (McDonald, 2007), ésta no fue caracterizada ni mapeada con suficiente detalle, para posibilitar la determinación taxonómica y composición tipológica del paisaje kárstico. El análisis detallado de la teoría kárstica tropical, MDES y ortofotos de alta resolución, y el correspondiente trabajo de campo y laboratorio, revelan la existencia de al menos 4 procesos geomorfológicos dominantes distribuidos en 19 patrones de lineamientos, y 4 tipos de colinas kársticas residuales con representatividad variable en toda el área kárstica del PEST y zona de influencia, entre otras características (véase **3.3**).

Considerando los caracteres diagnósticos de los diferentes paisajes kársticos de las zonas tropicales (véase **3.3.1**), se han determinado 4 géneros de paisaje kárstico, distribuidos en 19 patrones de lineamientos, dentro del área kárstica del PEST y zona de influencia (**Tabla 47**).

Tabla 47. Géneros de paisaje presentes dentro del área kárstica del PEST y zona de influencia

| Proceso geomorfológico dominante | Unidad geomorfológica de origen | Tipo de patrón de lineamientos | Patrones de lineamientos | Género de paisaje kárstico |
|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Erosión lineal | Karren | Paralelos | 1,2,9,13,14,15,18 | <i>Karst laberíntico</i> |
| Disolución generalizada | Dolina | Entrecruzados | 3,4,7,12,16,19 | <i>Karst poligonal</i> |
| Erosión fluvial | Valle | Dendritico | 5,6,11,17 | <i>Fluviokarst activo</i> |
| Aplanamiento por corrosión | Colina kárstica residual | Aislados | 8,10 | <i>Karst residual</i> |

La determinación taxonómica del tipo y subtipo de paisaje kárstico se realizó con base en los lineamientos de clasificación de la escuela indonesio-norteamericana de Day M. (1981) y Haryono E. (2004). Esto es, añadiendo a la terminología taxonómica tradicional, la unidad geomorfológica dominante de formas positivas mayores como elemento descriptivo (véase **3.3.1.6**). Las unidades codominantes y subdominantes fueron también integradas en la clasificación para coadyuvar la descripción de la composición tipológica del paisaje kárstico. Asimismo, se anexan las localidades tipo (*holotipos*¹²⁵ y *homotipos*¹²⁶) asociadas a cada paisaje kárstico.

Para comodidad en la presentación de los resultados y futuras investigaciones, a cada uno de los 19 patrones de lineamientos se le asignó un identificador textual a criterio del autor y conforme a la toponimia local (**Tabla 48**) (Peña Ramírez, 2012).

¹²⁵ Relieve que sirve como estándar de un paisaje en determinada categoría taxonómica (género, tipo, subtipo).

¹²⁶ Paisaje semejante o parecido al holotipo.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Tabla 48. Identificadores numéricos y textuales de los patrones de lineamientos
Patrones de lineamientos

| Identificador numérico | Identificador textual |
|------------------------|---|
| 1 | Coconá |
| 2 | Sierra Madrigal |
| 3 | San José Puyacatengo (Chapingo) |
| 4 | Vicente Guerrero (El Guanal) |
| 5 | Arroyo Cuncubac |
| 6 | Arroyo Libertad |
| 7 | Cerro La Iglesia |
| 8 | Poaná |
| 9 | Sierra Poaná Oeste |
| 10 | Lomas Alegres Tercera Sección (San Antonio) |
| 11 | Arroyo Sierra Poaná |
| 12 | Sierra Poaná Este |
| 13 | Cerro Chile |
| 14 | Cerro Mico |
| 15 | Tapijulapa |
| 16 | San Manuel |
| 17 | Arroyo Piedra Negra |
| 18 | Agua Escondida |
| 19 | Xicoténcatl |

A continuación se describe la caracterización geomorfológica y determinación taxonómica de los diferentes paisajes kársticos presentes en el área de estudio.

4.1.1 KARST LABERÍNTICO CÓNICO COCONÁ

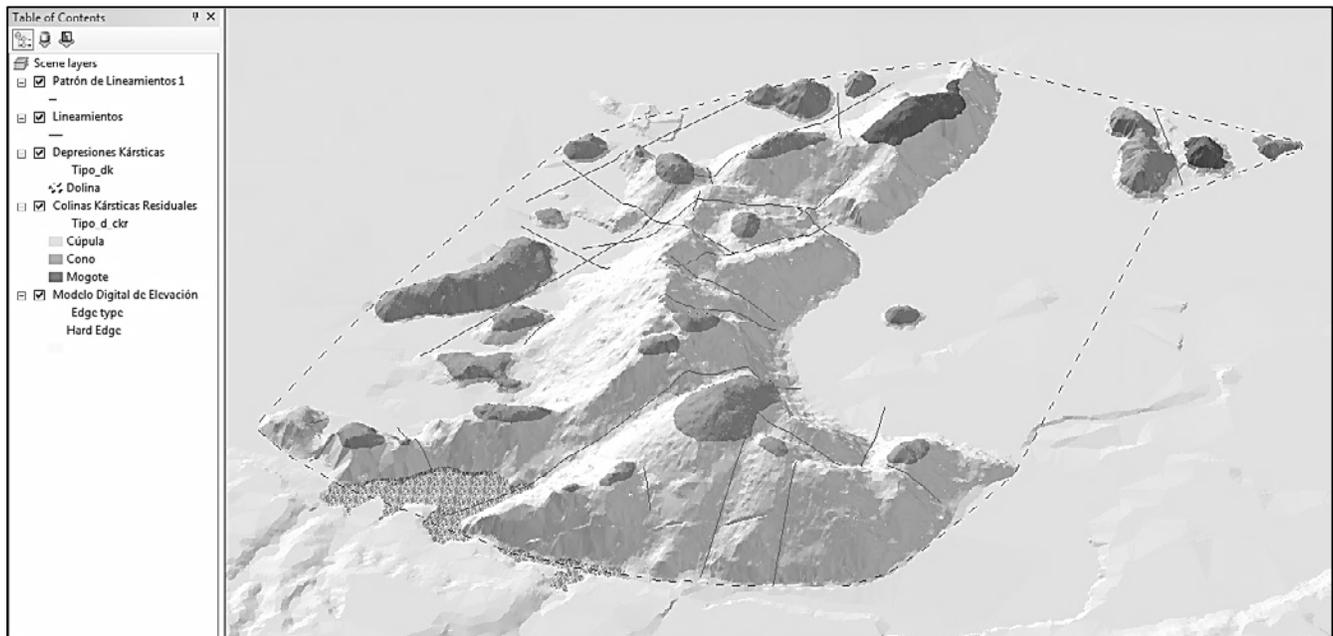


Figura 149. Modelo digital del Karst laberíntico cónico Coconá

| | | |
|---|--|--|
| Patrón de lineamientos | 1 | |
| Tipo de patrón de lineamientos | Paralelos | |
| Área | 7.42Km ² | |
| Estructura geológica | Domo calcáreo Coconá | |
| Pendiente regional | NE-SW | |
| Sistema de denudación kárstica | Autogénico-abierto | |
| Grado de karstificación | Medio (O5), Alto (O1,O2) | |
| Erosión | Vertical Horizontal | Media, Baja (O1,O2) Media, Alta (O1,O2) |
| Nivel base de disolución | Posición Dinámica | Inferior, a nivel Estable |
| Temperatura | | 25° casi constante |
| Grado de conservación forestal | | Alto (Natural y Cultural) (O1,O2) |
| Drenaje superficial | Abundancia Geometría Orientación | Media Valles en v o encajonados, rectilíneos o meándricos, paralelos (O1) En función del fracturamiento y la pendiente regional: NE-SW, NW-SE (O1) |
| | Descarga | En cantiles, ponores, dolinas periféricas y planicies de corrosión |
| | Condiciones de humedad | Mayormente húmedo |
| | Escorrentía | Intermitente, torrencial (O1,O5) |
| | Agua de infiltración | pH7 a 31° y 26° (O1,O5) |
| Control estructural (vías de disolución) | | Alto. Caracterizado por dos series de valles de fracturamiento controlado: NE-SW, NW-SE |
| Pendiente del relieve | | Suaves (0-40°), moderadas (40-60°), y en algunos casos empinadas (60-90°) |
| Litología carbonatada | Tipo de roca | Caliza <i>Mudstone</i> (Dunham, 1962) (M1) Dolomía (M4) |
| | Estratificación | Media 0.5-3m (M1) Fina 0.1-1m (M4) |
| | Intemperismo | No (M1,M4) |
| | Color | Gris oscuro (M1) Gris claro (M4) |
| | Dureza Mohs | 3.5 (M1,M4) |
| | Dureza Schmidt | 24 (n=9) (M1) |
| | Porosidad | Baja 4.8% (M1) Alta 14.3% (M4) |
| | Contenido fósil | No evidente |
| | Estructuras menores | Karren (M1) |

| | | | |
|--|---|---|--------------------|
| Lineamientos | Espeleotemas (M2) | | |
| | Abundancia | 26 | |
| | Densidad | 3.5 Lin/Km ² | |
| | Dispersión azimutal | Media (R-mag=0.35) | |
| | Longitud | Se extienden por más de 2.5Km | |
| | Orientación preferente | Primaria NE-SW Secundaria NW-SE | |
| Depresiones Kársticas | Clases de mayor frecuencia (Az) | | |
| | Abundancia | 2 | |
| | Densidad | 0.27 Dk/Km ² | |
| | Geometría | Grandes y alargadas | |
| | Distribución | Periférica | |
| | Longitud | Rango | 485-741m x 52-139m |
| | | Media | 613m x 95m |
| | Tipo evolutivo | Dolina | 2 |
| | | Polje | 0 |
| | Orden de escurrimiento | 0 | 0 |
| 1 | | 1 | |
| 2 | | 1 | |
| 3 | | 0 | |
| Colinas Kársticas Residuales | Abundancia | | |
| | 27 | | |
| | Densidad | | |
| | 3.64 Ckr/Km ² | | |
| | Geometría horizontal | | |
| | Mayormente alargadas | | |
| | Distribución | | |
| | Aisladas o encadenadas paralelamente a los lineamientos | | |
| Altura | Rango | 10-110m | |
| | Media | 56m | |
| | Tipo | Cúpula | 1 |
| | | Cono | 24 |
| Mogote | | 2 | |
| Torre | | 0 | |
| Proceso geomorfológico | Dominante | Erosión lineal en función del fracturamiento regional | |
| | Subdominantes | Disolución Erosión fluvial en función de la pendiente regional Aplanamiento por corrosión | |
| Factores de desarrollo kárstico | Primario | Estructura geológica | |
| | Secundario | Litología | |
| | Cuaternario | Pendiente regional Condiciones climáticas | |
| Evolución | Hipótesis | Es probable que un karst laberíntico incipiente con orientación NW-SE haya precedido a la actual disección NE-NW, NW-SE del domo calcáreo. Ambos en condiciones húmedas. | |
| | Evidencias paleokársticas | La orientación NW de las colinas kársticas residuales situadas al noreste del área, hablan probablemente de un paleokarst laberíntico con la misma orientación, controlado por el fracturamiento de un anticlinal laramídico. Su desarrollo, evidentemente más antiguo que el del resto del área, lo eximió en gran medida de los desplazamientos laterales izquierdos recientes (Mioceno-Plioceno), conservando así la orientación primaria del fracturamiento regional. | |
| Determinación taxonómica del paisaje kárstico | Género | <i>Karst laberíntico</i> (Brook, y otros, 1978) | |
| | Tipo | <i>Karst laberíntico cónico</i> (Haryono, y otros, 2004) | |
| | Subtipo | <i>Karst laberíntico cónico con mogotes y cúpula subdominantes</i> (Peña Ramírez, 2012) | |
| Localidades de referencia | Género | Homotipo <i>Karst laberíntico</i> (Brook, y otros, 1978) Montañas Estrella, Nueva Guinea | |
| | Tipo | Holotipo <i>Karst laberíntico cónico</i> (Haryono, y otros, 2004) Gunung Sewu, Indonesia | |
| | | Homotipo <i>Karst laberíntico cónico</i> (Haryono, y otros, 2004) Valle Fengcong | |



Figura 150. Sección norte del domo calcáreo al fondo de la planicie de corrosión kárstica
Mogote kárstico al fondo y cono al frente a la derecha
Fotografía de campo



Figura 151. Karst residual en el extremo noreste del conjunto laberíntico
Cono kárstico a la izquierda y mogote a la derecha
Fotografía de Campo

4.1.2 KARST LABERÍNTICO CÓNICO SIERRA MADRIGAL

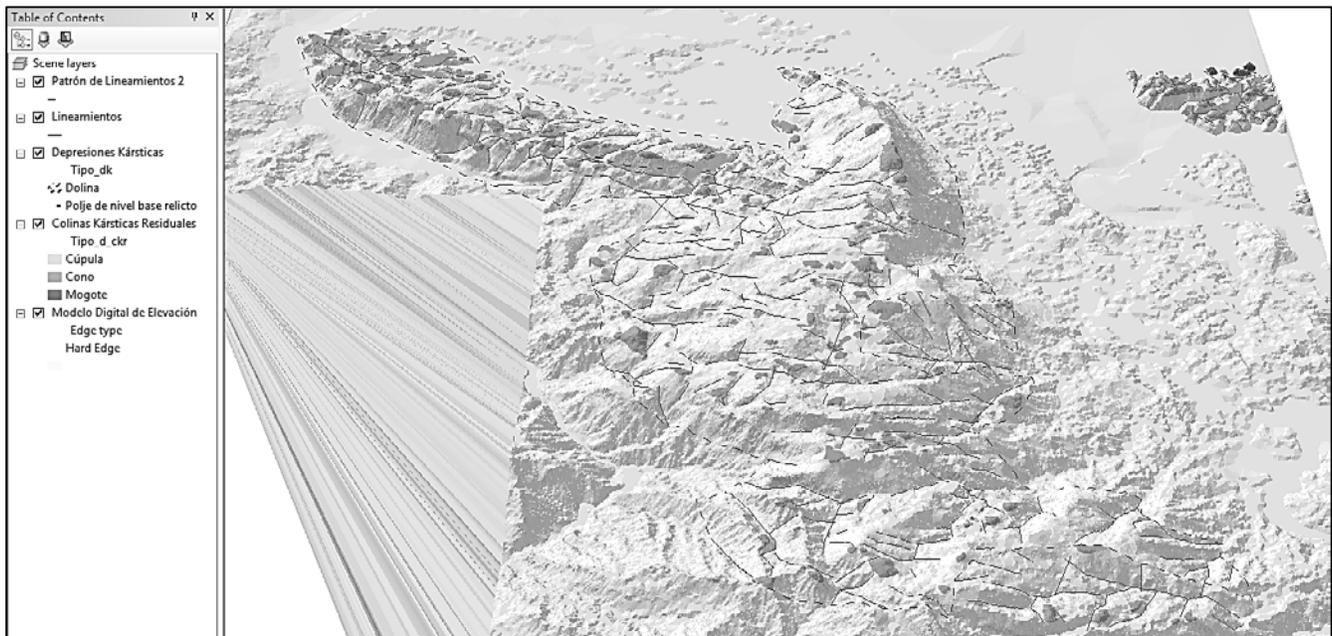


Figura 152. Modelo digital del *Karst laberíntico cónico* Sierra Madrigal

| | | |
|---|--|--|
| Patrón de lineamientos | 2 | |
| Tipo de patrón de lineamientos | Paralelos | |
| Área | 68.52Km ² | |
| Estructura geológica | Anticlinal recumbente Primavera y Primavera 1 | |
| Pendiente regional | NE-SW | |
| Sistema de denudación kárstica | Autogénico-abierto | |
| Grado de karstificación | Medio | |
| Erosión | Vertical Horizontal | Media Media |
| Nivel base de disolución | Posición Dinámica | Inferior Estable |
| Temperatura | 25° casi constante | |
| Grado de conservación forestal | Alto (Natural y Cultural) | |
| Drenaje superficial | Abundancia Geometría Orientación Descarga Condiciones de humedad Escorrentía Agua de infiltración | Media Valles en v o encajonados, rectilíneos o meándricos, paralelos En función del fracturamiento y la pendiente regional: NE-SW, NW-SE En cantiles, ponores, dolinas y poljes Mayormente húmedo Intermitente, torrencial - |
| Control estructural (vías de disolución) | Alto. Caracterizado por dos series de valles de fracturamiento controlado: NE-SW, NW-SE | |
| Pendiente del relieve | Suaves (0-40°), moderadas (40-60°), y empinadas (60-90°) | |
| Litología carbonatada | Tipo de roca Estratificación Intemperismo Color Dureza Mohs Dureza Schmidt Porosidad Contenido fósil Estructuras menores | Caliza-Lutita (Islas Tenorio, y otros, 2005) - - - - - - - |
| Lineamientos | Abundancia Densidad Dispersión azimutal Longitud Orientación preferente | 348 5.08 Lin/Km ² Alta (R-mag=0.19) Se extienden por más de 1.3Km Primaria NE-SW |

| | | | Secundaria NW-SE |
|--|---------------------------------|---|---|
| Depresiones Kársticas | Clases de mayor frecuencia (Az) | | 40-50,70-80,90-100 (3) |
| | Abundancia | | 38 |
| | Densidad | | 0.55 Dk/Km ² |
| | Geometría | | Grandes y alargadas |
| | Distribución | | Alineadas |
| | Longitud | Rango | 25-1042m x 15-211m |
| | | Media | 275m x 86m |
| | Tipo evolutivo | Dolina | 37 |
| | | Polje | 1 de nivel base relicto |
| | Orden de escurrimiento | 0 | 0 |
| 1 | | 16 | |
| 2 | | 16 | |
| 3 | | 6 | |
| Colinas Kársticas Residuales | Abundancia | | 156 |
| | Densidad | | 2.28 Ckr/Km ² |
| | Geometría horizontal | | Mayormente alargadas |
| | Distribución | | Aisladas, agrupadas o encadenadas paralelamente a los lineamientos |
| | Altura | Rango | 5-115m |
| | | Media | 21m |
| | Tipo | Cúpula | 18 |
| | | Cono | 138 |
| Mogote | | 0 | |
| Torre | | 0 | |
| Proceso geomorfológico | Dominante | | Erosión lineal en función del fracturamiento regional |
| | Subdominantes | | Disolución Erosión fluvial en función de la pendiente regional |
| Factores de desarrollo kárstico | Primario | | Estructura geológica |
| | Secundario | | Litología |
| | Terciario | | Pendiente regional |
| | Cuaternario | | Condiciones climáticas |
| Evolución | Hipótesis | | Es probable que las áreas poligonales (pl3y4), asociadas al bloque laberíntico (pl2), tengan un desarrollo kárstico más antiguo. Esto debido a la marcada karstificación prematura de vías de disolución laramídicas NW-SE, sumada a la del fracturamiento reciente (Mioceno-Plioceno). |
| | Evidencias paleokársticas | | Mayor frecuencia de lineamientos con orientación NW-SE dentro y en la periferia de las áreas poligonales. |
| Determinación taxonómica del paisaje kárstico | Género | | <i>Karst laberíntico</i> (Brook, y otros, 1978) |
| | Tipo | | <i>Karst laberíntico cónico</i> (Haryono, y otros, 2004) |
| | Subtipo | | <i>Karst laberíntico cónico con cúpulas subdominantes</i> (Peña Ramírez, 2012) |
| Localidades de referencia | Género | Homotipo | <i>Karst laberíntico</i> (Brook, y otros, 1978) Montañas Estrella, Nueva Guinea |
| | | Holotipo | <i>Karst laberíntico cónico</i> (Haryono, y otros, 2004) Gunung Sewu, Indonesia |
| | Homotipo | <i>Karst laberíntico cónico</i> (Haryono, y otros, 2004) Valle Fengcong | |



Figura 153. Vertiente este del anticlinal Primavera I
Fotografía de campo



Figura 154. Vista norte del Karst laberíntico cónico Sierra Madrigal desde Eureka y Belén
Fotografía de campo

4.1.3 KARST POLIGONAL CÓNICO SAN JOSÉ PUYACATENGO (CHAPINGO)

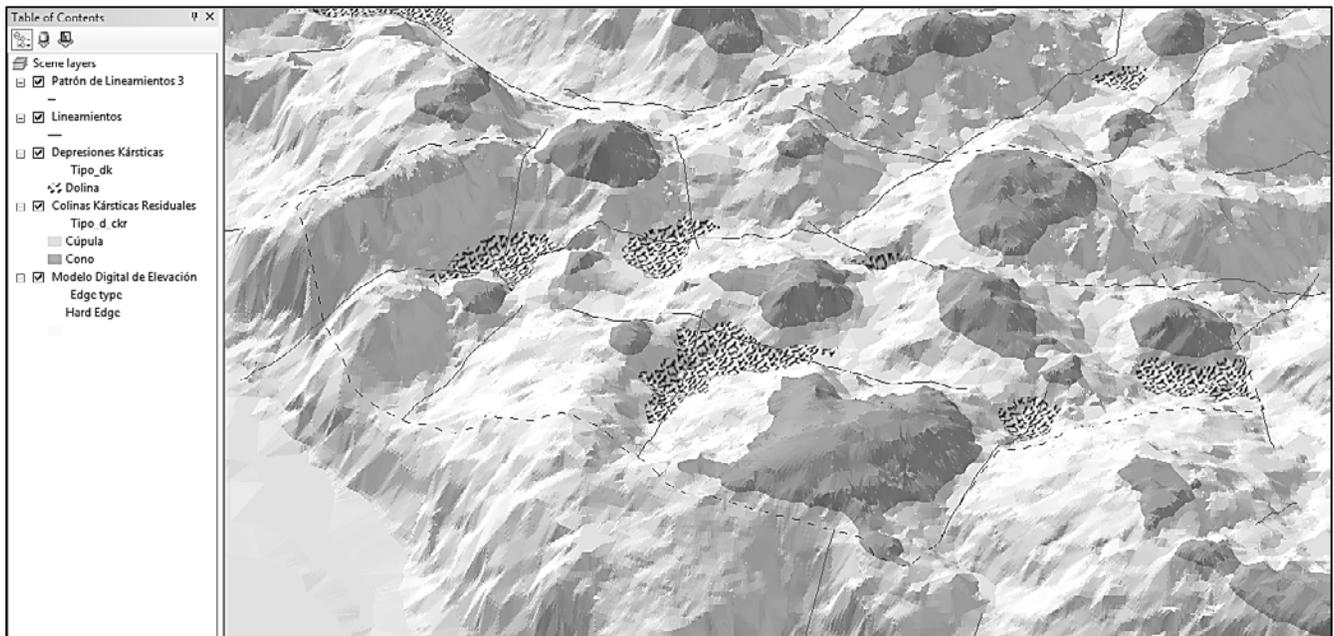


Figura 155. Modelo digital del *Karst poligonal cónico* San José Puyacatengo

| | | |
|---|------------------------|--|
| Patrón de lineamientos | | 3 |
| Tipo de patrón de lineamientos | | Entrecruzados |
| Área | | 1.23Km ² |
| Estructura geológica | | Anticlinal recumbente Primavera |
| Pendiente regional | | NE-SW |
| Sistema de denudación kárstica | | Autogénico-abierto |
| Grado de karstificación | | Medio |
| Erosión | Vertical | Media |
| | Horizontal | Media |
| Nivel base de disolución | Posición | Inferior |
| | Dinámica | Estable |
| Temperatura | | 25° casi constante |
| Grado de conservación forestal | | Alto (Natural y Cultural) |
| Drenaje superficial | Abundancia | Baja |
| | Geometría | Malla poligonal de captación centrípeta con valles meándricos o dendríticos fragmentados |
| | Orientación | Desordenado y en función del fracturamiento: NE-SW, NE-SW |
| | Descarga | En cantiles, ponores y dolinas |
| | Condiciones de humedad | Mayormente húmedo |
| | Escorrentía | Intermitente, torrencial |
| | Agua de infiltración | - |
| Control estructural (vías de disolución) | | Alto. Caracterizado por una serie de valles fragmentados de fracturamiento controlado: NE-SW |
| Pendiente del relieve | | Suaves (0-40°), moderadas (40-60°), y en algunos casos empinadas (60-90°) |
| Litología carbonatada | Tipo de roca | Caliza-Lutita (Islas Tenorio, y otros, 2005) |
| | Estratificación | - |
| | Intemperismo | - |
| | Color | - |
| | Dureza Mohs | - |
| | Dureza Schmidt | - |
| | Porosidad | - |
| | Contenido fósil | - |
| | Estructuras menores | - |
| Lineamientos | Abundancia | 13 |
| | Densidad | 10.58 Lin/Km ² |
| | Dispersión azimutal | Alta (R-mag=0.29) |

| | | | | |
|--|---------------------------------|---|--|--|
| | Longitud | Se extienden por más de 1Km | | |
| | Orientación preferente | Primaria NE-SW | | |
| | Clases de mayor frecuencia (Az) | 10-20,20-30,40-50,70-80 (4) | | |
| Depresiones Kársticas | Abundancia | 6 | | |
| | Densidad | 4.88 Dk/Km ² | | |
| | Geometría | Medianas y alargadas | | |
| | Distribución | Regular | | |
| | Longitud | Rango | 105-409m x 51-84m | |
| | | Media | 250m x 74m | |
| | Tipo evolutivo | Dolina | 6 | |
| | | Polje | 0 | |
| | Orden de escurrimiento | 0 | 0 | |
| | | 1 | 2 | |
| 2 | | 3 | | |
| 3 | | 1 | | |
| Colinas Kársticas Residuales | Abundancia | 13 | | |
| | Densidad | 10.58 Ckr/Km ² | | |
| | Geometría horizontal | Mayormente redondeadas | | |
| | Distribución | Regular | | |
| | Altura | Rango | 10-65m | |
| | | Media | 28m | |
| | Tipo | Cúpula | 2 | |
| | | Cono | 11 | |
| | | Mogote | 0 | |
| | Torre | 0 | | |
| Proceso geomorfológico | Dominante | Disolución | | |
| | Subdominantes | Erosión lineal en función del fracturamiento regional Erosión fluvial en función de la pendiente regional | | |
| Factores de desarrollo kárstico | Primario | Litología | | |
| | Secundario | Estructura geológica | | |
| | Terciario | Pendiente regional | | |
| | Cuaternario | Condiciones climáticas | | |
| Evolución | Hipótesis | Es probable que las áreas poligonales (pl3y4), asociadas al bloque laberíntico (pl2), tengan un desarrollo kárstico más antiguo. Esto debido a la marcada karstificación prematura de vías de disolución laramídicas NW-SE, sumada a la del fracturamiento reciente (Mioceno-Plioceno). | | |
| | Evidencias paleokársticas | Mayor frecuencia de lineamientos con orientación NW-SE dentro y en la periferia de las áreas poligonales. | | |
| Determinación taxonómica del paisaje kárstico | Género | <i>Karst poligonal</i> (Williams, 1972) | | |
| | Tipo | <i>Karst poligonal cónico</i> (Peña Ramírez, 2012) | | |
| | Subtipo | <i>Karst poligonal cónico con cúpulas subdominantes</i> (Peña Ramírez, 2012) | | |
| Localidades de referencia | Género | Homotipo | <i>Karst poligonal</i> (Williams, 1972) Papúa Nueva Guinea | |
| | Tipo | Holotipo | <i>Karst poligonal cónico</i> (Peña Ramírez, 2012) Sierra de Tabasco, México | |
| | | Homotipo | <i>Karst poligonal cónico</i> (Williams, 1972) (Peña Ramírez, 2012) Papúa Nueva Guinea | |

4.1.4 KARST POLIGONAL CÓNICO VICENTE GUERRERO (EL GUANAL)

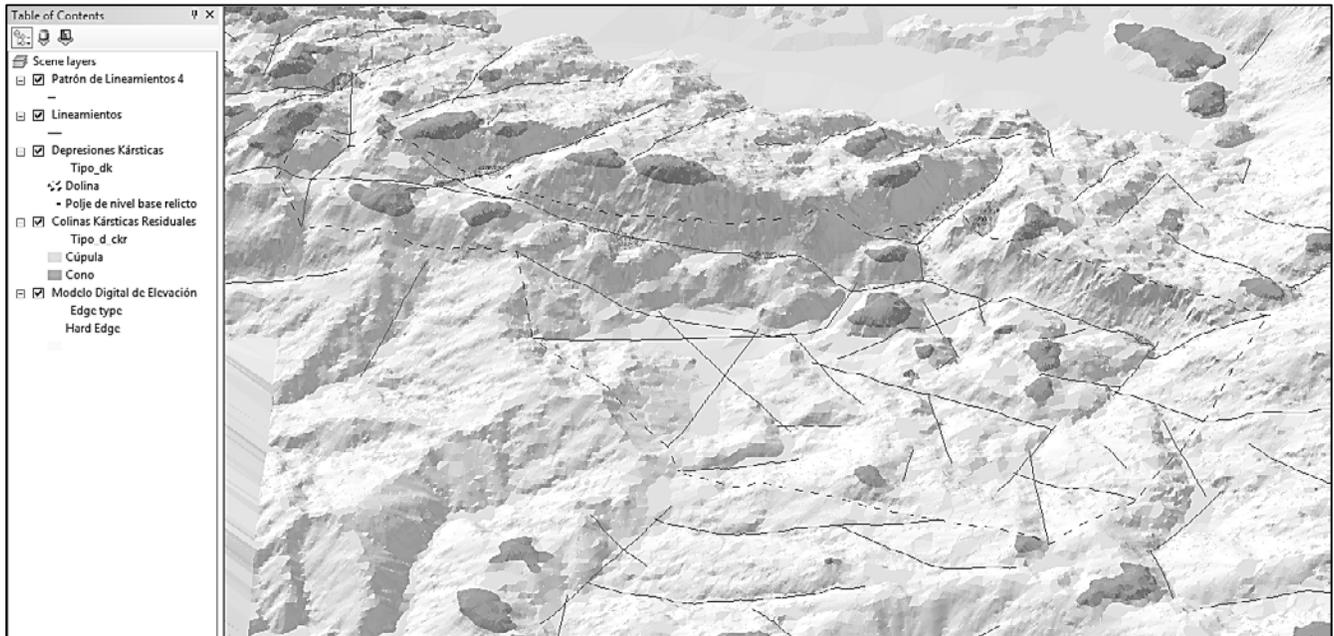


Figura 156. Modelo digital del *Karst poligonal cónico* Vicente Guerrero (El Guanal)

| | | |
|---|--|--|
| Patrón de lineamientos | 4 | |
| Tipo de patrón de lineamientos | Entrecruzados | |
| Área | 4.97Km ² | |
| Estructura geológica | Anticlinal recumbente Primavera | |
| Pendiente regional | NE-SW | |
| Sistema de denudación kárstica | Autogénico-abierto | |
| Grado de karstificación | Medio | |
| Erosión | Vertical Horizontal | Media Media |
| Nivel base de disolución | Posición Dinámica | Inferior Estable |
| Temperatura | 25° casi constante | |
| Grado de conservación forestal | Alto (Natural y Cultural) | |
| Drenaje superficial | Abundancia Geometría | Baja Malla poligonal de captación centrípeta con valles meándricos o dendríticos fragmentados |
| | Orientación | Desordenado y en función del fracturamiento: NW-SE, NE-SW |
| | Descarga | En cantiles, ponores y dolinas |
| | Condiciones de humedad | Mayormente húmedo |
| | Escorrentía | Intermitente, torrencial |
| | Agua de infiltración | - |
| Control estructural (vías de disolución) | Alto. Caracterizado por dos series de valles fragmentados de fracturamiento controlado: NW-SE, NE-SW | |
| Pendiente del relieve | Suaves (0-40°), moderadas (40-60°), y en algunos casos empinadas (60-90°) | |
| Litología carbonatada | Tipo de roca Estratificación Intemperismo Color Dureza Mohs Dureza Schmidt Porosidad Contenido fósil Estructuras menores | Caliza-Lutita (Islas Tenorio, y otros, 2005) - - - - - - - - |
| Lineamientos | Abundancia Densidad Dispersión azimutal | 41 8.24 Lin/Km ² Alta (R-mag=0.21) |

| | | | | |
|--|---------------------------------|---|--|--|
| | Longitud | Se extienden por más de 1.1Km | | |
| | Orientación preferente | Primaria NW-SE Secundaria NE-SW | | |
| | Clases de mayor frecuencia (Az) | 120-130,170-180,80-90 (3) | | |
| Depresiones Kársticas | Abundancia | 7 | | |
| | Densidad | 1.41 Dk/Km ² | | |
| | Geometría | Medianas y alargadas | | |
| | Distribución | Regular | | |
| | Longitud | Rango | 75-1042m x 43-104m | |
| | | Media | 299m x 63m | |
| | Tipo evolutivo | Dolina | 6 | |
| | | Polje | 1 de nivel base relicto | |
| | Orden de escurrimiento | 0 | 1 | |
| | | 1 | 3 | |
| 2 | | 2 | | |
| 3 | | 1 | | |
| Colinas Kársticas Residuales | Abundancia | 17 | | |
| | Densidad | 3.42 Ckr/Km ² | | |
| | Geometría horizontal | Mayormente redondeadas | | |
| | Distribución | Regular | | |
| | Altura | Rango | 5-40m | |
| | | Media | 20m | |
| | Tipo | Cúpula | 7 | |
| | | Cono | 10 | |
| Mogote | | 0 | | |
| Torre | | 0 | | |
| Proceso geomorfológico | Dominante | Disolución | | |
| | Subdominantes | Erosión lineal en función del fracturamiento regional Erosión fluvial en función de la pendiente regional | | |
| Factores de desarrollo kárstico | Primario | Litología | | |
| | Secundario | Estructura geológica | | |
| | Terciario | Pendiente regional | | |
| | Cuaternario | Condiciones climáticas | | |
| Evolución | Hipótesis | Es probable que las áreas poligonales (pl3y4), asociadas al bloque laberíntico (pl2), tengan un desarrollo kárstico más antiguo. Esto debido a la marcada karstificación prematura de vías de disolución laramídicas NW-SE, sumada a la del fracturamiento reciente (Mioceno-Plioceno). | | |
| | Evidencias paleokársticas | Mayor frecuencia de lineamientos con orientación NW-SE dentro y en la periferia de las áreas poligonales. | | |
| Determinación taxonómica del paisaje kárstico | Género | <i>Karst poligonal</i> (Williams, 1972) | | |
| | Tipo | <i>Karst poligonal cónico</i> (Peña Ramírez, 2012) | | |
| | Subtipo | <i>Karst poligonal cónico con cúpulas subdominantes</i> (Peña Ramírez, 2012) | | |
| Localidades de referencia | Género | Homotipo | <i>Karst poligonal</i> (Williams, 1972) Papúa Nueva Guinea | |
| | Tipo | Holotipo | <i>Karst poligonal cónico</i> (Peña Ramírez, 2012) Sierra de Tabasco, México | |
| | | Homotipo | <i>Karst poligonal cónico</i> (Williams, 1972) (Peña Ramírez, 2012) Papúa Nueva Guinea | |

4.1.5 FLUVIOKARST ACTIVO CÓNICO ARROYO CUNCUBAC



Figura 157. Modelo digital del *Fluviokarst activo cónico* Arroyo Cuncubac

| | | |
|---|--|--|
| Patrón de lineamientos | 5 | |
| Tipo de patrón de lineamientos | Dendrítico | |
| Área | 2.67Km ² | |
| Estructura geológica | Anticlinal recumbente Primavera 1 | |
| Pendiente regional | NE | |
| Sistema de denudación kárstica | Autogénico-abierto | |
| Grado de karstificación | Medio | |
| Erosión | Vertical Horizontal | Media Media |
| Nivel base de disolución | Posición Dinámica | Inferior Estable |
| Temperatura | 25° casi constante | |
| Grado de conservación forestal | Alto (Natural y Cultural) | |
| Drenaje superficial | Abundancia Geometría Orientación Descarga Condiciones de humedad Escorrentía Agua de infiltración | Alta Valles en v, ciegos y semiciegos, dendrítico En función de la pendiente y fracturamiento regional: NE, NW-SE En cantiles y ponores Mayormente húmedo Intermitente, torrencial - |
| Control estructural (vías de disolución) | Medio. Caracterizado por una serie de valles de fracturamiento controlado: NW-SE | |
| Pendiente del relieve | Suaves (0-40°) y moderadas (40-60°) | |
| Litología carbonatada | Tipo de roca Estratificación Intemperismo Color Dureza Mohs Dureza Schmidt Porosidad Contenido fósil Estructuras menores | Caliza-Lutita (Islas Tenorio, y otros, 2005) - - - - - - - |
| Lineamientos | Abundancia Densidad Dispersión azimutal Longitud Orientación preferente | 12 4.48 Lin/Km ² Alta (R-mag=0.2) Se extienden por más de 2.3Km Primaria NW-SE |

| | | | |
|--|---------------------------------|---|-------------------|
| | Clases de mayor frecuencia (Az) | 150-160 (1) | |
| Depresiones Kársticas | Abundancia | 3 | |
| | Densidad | 1.12 Dk/Km ² | |
| | Geometría | Pequeñas y redondeadas | |
| | Distribución | Periférica | |
| | Longitud | Rango | 64-273m x 19-120m |
| | | Media | 137m x 64m |
| | Tipo evolutivo | Dolina | 3 |
| | | Polje | 0 |
| | Orden de escurrimiento | 0 | 0 |
| | | 1 | 0 |
| 2 | | 3 | |
| | 3 | 0 | |
| Colinas Kársticas Residuales | Abundancia | 7 | |
| | Densidad | 2.62 Ckr/Km ² | |
| | Geometría horizontal | Mayormente alargadas | |
| | Distribución | Periférica | |
| | Altura | Rango | 10-35m |
| | | Media | 14m |
| | Tipo | Cúpula | 1 |
| | | Cono | 6 |
| Mogote | | 0 | |
| | Torre | 0 | |
| Proceso geomorfológico | Dominante | Erosión fluvial en función de la pendiente regional | |
| | Subdominantes | Erosión lineal en función del fracturamiento regional Disolución | |
| Factores de desarrollo kárstico | Primario | Pendiente regional | |
| | Secundario | Condiciones climáticas | |
| | Terciario | Estructura geológica | |
| | Cuaternario | Litología | |
| Evolución | Hipótesis | Posiblemente, las áreas fluviokársticas (pl5y6) asociadas al bloque laberíntico (pl2) deban su condición a procesos relacionados con el gradiente topográfico y oscilaciones paleoclimáticas. | |
| | Evidencias paleokársticas | El gradiente topográfico del anticlinal Primavera 1 es mayor en su costado este, lo cual, sumado a las condiciones climáticas contemporáneas del área, ha dado pie a que las lluvias torrenciales de temporal superen la capacidad de captación del sistema kárstico. En consecuencia se han desarrollado cuencas fluviales de considerables dimensiones. | |
| Determinación taxonómica del paisaje kárstico | Género | <i>Fluviokarst activo</i> (Gunn, 2004) | |
| | Tipo | <i>Fluviokarst activo cónico</i> (Peña Ramírez, 2012) | |
| | Subtipo | <i>Fluviokarst activo cónico con cúpula subdominante</i> (Peña Ramírez, 2012) | |
| Localidades de referencia | Género | Homotipo <i>Fluviokarst activo</i> (Miller, (1982) 2007) Belice | |
| | Tipo | Holotipo <i>Fluviokarst activo cónico</i> (Peña Ramírez, 2012) Sierra de Tabasco, México | |



Figura 158. Vista este del *Fluviokarst activo cónico* Arroyo Cuncubac (al fondo centro izquierda)
Fotografía de campo

4.1.6 FLUVIOKARST ACTIVO CÓNICO ARROYO LIBERTAD

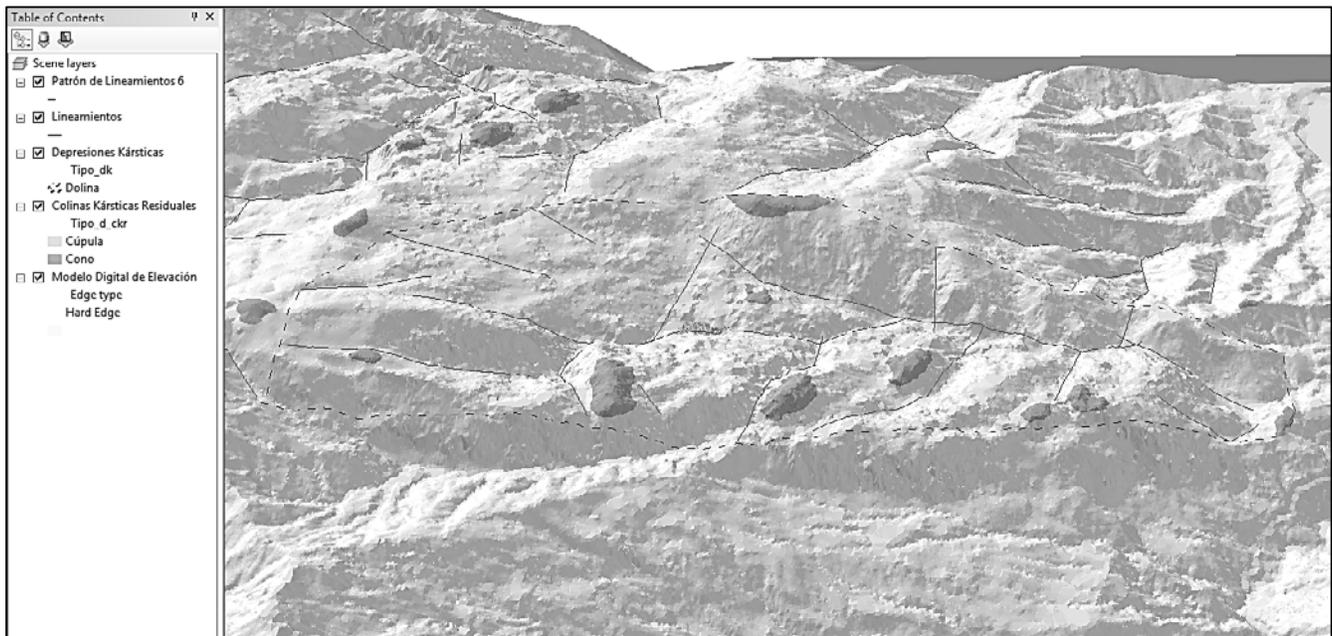


Figura 159. Modelo digital del *Fluviokarst activo cónico* Arroyo Libertad

| | | |
|---|--|--|
| Patrón de lineamientos | 6 | |
| Tipo de patrón de lineamientos | Dendrítico | |
| Área | 4.28Km ² | |
| Estructura geológica | Anticlinal recumbente Primavera 1 | |
| Pendiente regional | NE | |
| Sistema de denudación kárstica | Autogénico-abierto | |
| Grado de karstificación | Medio | |
| Erosión | Vertical Horizontal | Media Media |
| Nivel base de disolución | Posición Dinámica | Inferior Estable |
| Temperatura | 25° casi constante | |
| Grado de conservación forestal | Alto (Natural y Cultural) | |
| Drenaje superficial | Abundancia Geometría Orientación Descarga Condiciones de humedad Escorrentía Agua de infiltración | Alta Valles en v, ciegos y semiciegos, dendrítico En función de la pendiente y fracturamiento regional: NE-SW En cantiles y ponores Mayormente húmedo Intermitente, torrencial - |
| Control estructural (vías de disolución) | Medio. Caracterizado por una serie de valles de fracturamiento controlado: NE-SW | |
| Pendiente del relieve | Suaves (0-40°) y moderadas (40-60°) | |
| Litología carbonatada | Tipo de roca Estratificación Intemperismo Color Dureza Mohs Dureza Schmidt Porosidad Contenido fósil Estructuras menores | Caliza-Lutita (Islas Tenorio, y otros, 2005) - - - - - - - |
| Lineamientos | Abundancia Densidad Dispersión azimutal Longitud Orientación preferente | 26 6.07 Lin/Km ² Media (R-mag=0.3) Se extienden por más de 1.3Km Primaria NE-SW |

| | | | |
|--|---------------------------------|---|------------|
| | Clases de mayor frecuencia (Az) | 20-30 (1) | |
| Depresiones Kársticas | Abundancia | 1 | |
| | Densidad | 0.23 Dk/Km ² | |
| | Geometría | Pequeña y redondeada | |
| | Distribución | Central | |
| | Longitud | Rango | 233m x 47m |
| | | Media | 233m x 47m |
| | Tipo evolutivo | Dolina | 1 |
| | | Polje | 0 |
| | Orden de escurrimiento | 0 | 0 |
| | | 1 | 0 |
| 2 | | 1 | |
| | 3 | 0 | |
| Colinas Kársticas Residuales | Abundancia | 9 | |
| | Densidad | 2.1 Ckr/Km ² | |
| | Geometría horizontal | Mayormente alargadas | |
| | Distribución | Regular | |
| | Altura | Rango | 10-45m |
| | | Media | 23m |
| | Tipo | Cúpula | 0 |
| | | Cono | 9 |
| Mogote | | 0 | |
| | Torre | 0 | |
| Proceso geomorfológico | Dominante | Erosión fluvial en función de la pendiente regional | |
| | Subdominantes | Erosión lineal en función del fracturamiento regional Disolución | |
| Factores de desarrollo kárstico | Primario | Pendiente regional | |
| | Secundario | Condiciones climáticas | |
| | Terciario | Estructura geológica | |
| | Cuaternario | Litología | |
| Evolución | Hipótesis | Posiblemente, las áreas fluviokársticas (pl5y6) asociadas al bloque laberíntico (pl2) deban su condición a procesos relacionados con el gradiente topográfico y oscilaciones paleoclimáticas. | |
| | Evidencias paleokársticas | El gradiente topográfico del anticlinal Primavera 1 es mayor en su costado este, lo cual, sumado a las condiciones climáticas contemporáneas del área, ha dado pie a que las lluvias torrenciales de temporal superen la capacidad de captación del sistema kárstico. En consecuencia se han desarrollado cuencas fluviales de considerables dimensiones. | |
| Determinación taxonómica del paisaje kárstico | Género | <i>Fluviokarst activo</i> (Gunn, 2004) | |
| | Tipo | <i>Fluviokarst activo cónico</i> (Peña Ramírez, 2012) | |
| Localidades de referencia | Género | Homotipo <i>Fluviokarst activo</i> (Miller, (1982) 2007) Belice | |
| | Tipo | Holotipo <i>Fluviokarst activo cónico</i> (Peña Ramírez, 2012) Sierra de Tabasco, México | |

4.1.7 KARST POLIGONAL CÓNICO CERRO LA IGLESIA

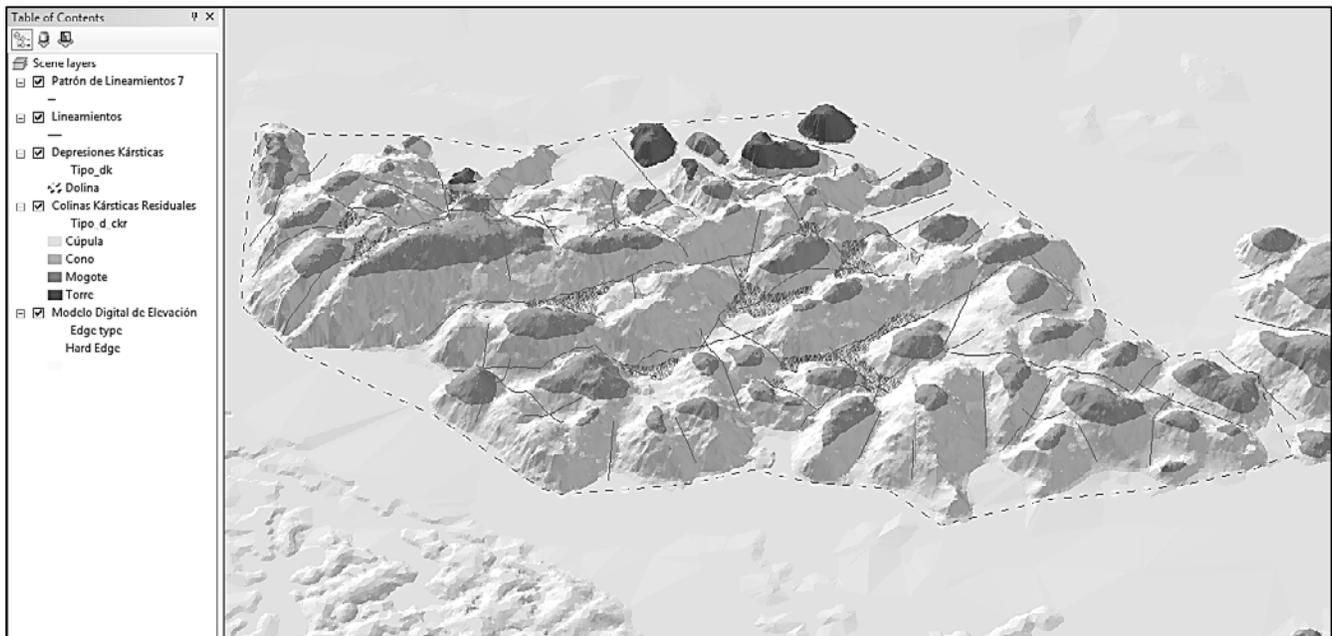


Figura 160. Modelo digital del Karst poligonal cónico Cerro La Iglesia

| | | |
|---|------------------------|--|
| Patrón de lineamientos | | 7 |
| Tipo de patrón de lineamientos | | Entrecruzados |
| Área | | 5.55Km ² |
| Estructura geológica | | Anticlinal cilíndrico con cierre periclinal Miraflores |
| Pendiente regional | | NE-SW |
| Sistema de denudación kárstica | | Autogénico-abierto |
| Grado de karstificación | | Medio |
| Erosión | Vertical | Media |
| | Horizontal | Media |
| Nivel base de disolución | Posición | Inferior |
| | Dinámica | Estable |
| Temperatura | | 26° casi constante |
| Grado de conservación forestal | | Alto (Natural y Cultural) |
| Drenaje superficial | Abundancia | Baja |
| | Geometría | Malla poligonal de captación centripeta con valles meándricos o dendríticos fragmentados |
| | Orientación | Desordenado y en función del fracturamiento: NE-SW, NW-SE |
| | Descarga | En cantiles, ponores, dolinas y planicies de corrosión |
| | Condiciones de humedad | Mayormente húmedo |
| | Escorrentía | Intermitente, torrencial |
| | Agua de infiltración | - |
| Control estructural (vías de disolución) | | Alto. Caracterizado por dos series de valles fragmentados de fracturamiento controlado: NE-SW, NW-SE |
| Pendiente del relieve | | Suaves (0-40°), moderadas (40-60°), y en algunos casos empinadas (60-90°) |
| Litología carbonatada | Tipo de roca | Caliza-Lutita (Islas Tenorio, y otros, 2005) |
| | Estratificación | - |
| | Intemperismo | - |
| | Color | - |
| | Dureza Mohs | - |
| | Dureza Schmidt | - |
| | Porosidad | - |
| | Contenido fósil | - |
| | Estructuras menores | - |
| Lineamientos | Abundancia | 80 |
| | Densidad | 14.42 Lin/Km ² |
| | Dispersión azimutal | Alta (R-mag=0.1) |

| | | | | |
|--|---------------------------------|----------|--|-------------------|
| | Longitud | | Se extienden por más de 0.8Km | |
| | Orientación preferente | | Primaria NE-SW Secundaria NW-SE | |
| | Clases de mayor frecuencia (Az) | | 0-10,20-30,60-70,130-140 (4) | |
| Depresiones Kársticas | Abundancia | | 10 | |
| | Densidad | | 1.8 Dk/Km ² | |
| | Geometría | | Medianas y alargadas | |
| | Distribución | | Regular | |
| | Longitud | Rango | | 73-553m x 50-134m |
| | | Media | | 199m x 70m |
| | Tipo evolutivo | Dolina | | 10 |
| | | Polje | | 0 |
| | Orden de escurrimiento | 0 | | 1 |
| | | 1 | | 4 |
| 2 | | | 4 | |
| 3 | | | 1 | |
| Colinas Kársticas Residuales | Abundancia | | 60 | |
| | Densidad | | 10.81 Ckr/Km ² | |
| | Geometría horizontal | | Alargadas y redondeadas | |
| | Distribución | | Regular o encadenadas paralelamente a los lineamientos | |
| | Altura | Rango | | 10-125m |
| | | Media | | 52m |
| | Tipo | Cúpula | | 8 |
| | | Cono | | 47 |
| Mogote | | | 5 | |
| | Torre | | 0 | |
| Proceso geomorfológico | Dominante | | Disolución | |
| | Subdominantes | | Erosión lineal en función del fracturamiento regional Erosión fluvial en función de la pendiente regional Aplanamiento por corrosión | |
| Factores de desarrollo kárstico | Primario | | Litología | |
| | Secundario | | Estructura geológica | |
| | Terciario | | Pendiente regional | |
| | Cuaternario | | Condiciones climáticas | |
| Evolución | Hipótesis | | Es posible que este bloque calcáreo haya sido sumamente susceptible al fracturamiento lateral izquierdo reciente (Mioceno-Plioceno) | |
| | Evidencias paleokársticas | | Esta área kárstica presenta numerosas alineaciones fragmentadas con orientación NE-SW, las cuales se pierden entre sus semejantes cuasi perpendiculares. | |
| Determinación taxonómica del paisaje kárstico | Género | | <i>Karst poligonal</i> (Williams, 1972) | |
| | Tipo | | <i>Karst poligonal cónico</i> (Peña Ramírez, 2012) | |
| | Subtipo | | <i>Karst poligonal cónico con cúpulas y mogotes subdominantes</i> (Peña Ramírez, 2012) | |
| Localidades de referencia | Género | Homotipo | <i>Karst poligonal</i> (Williams, 1972) Papúa Nueva Guinea | |
| | Tipo | Holotipo | <i>Karst poligonal cónico</i> (Peña Ramírez, 2012) Sierra de Tabasco, México | |
| | | Homotipo | <i>Karst poligonal cónico</i> (Williams, 1972) (Peña Ramírez, 2012) Papúa Nueva Guinea | |



Figura 161. Vista norte del *Karst poligonal cónico* Cerro La Iglesia (al frente derecha)
Fotografía de campo

4.1.8 KARST RESIDUAL CÓNICO POANÁ

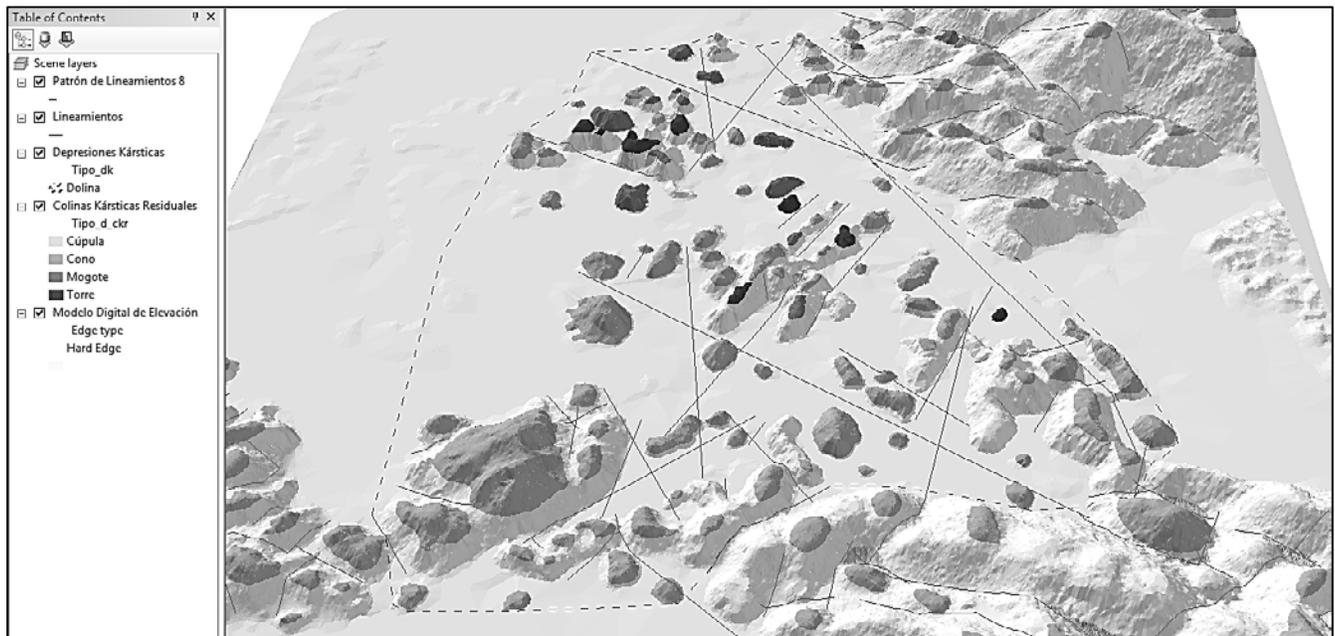


Figura 162. Modelo digital del Karst residual cónico Poaná

| | |
|---|--|
| Patrón de lineamientos | 8 |
| Tipo de patrón de lineamientos | Aislados |
| Área | 12.53Km ² |
| Estructura geológica | Sinclinal |
| Pendiente regional | N |
| Sistema de denudación kárstica | Mixto |
| Grado de karstificación | Alto (O8) |
| Erosión | Vertical |
| | Horizontal |
| | Alta (O8) |
| Nivel base de disolución | Posición |
| | Dinámica |
| | A nivel |
| | Estable |
| Temperatura | 26° casi constante |
| Grado de conservación forestal | Alto (Natural y Cultural) (O8) |
| Drenaje superficial | Abundancia |
| | Geometría |
| | Orientación |
| | Descarga |
| | Condiciones de humedad |
| | Escorrentía |
| | Agua de infiltración |
| | - |
| Control estructural (vías de disolución) | Alto. Caracterizado por dos series de valles fragmentados de fracturamiento controlado: NE-SW, NW-SE |
| Pendiente del relieve | Moderadas (40-60°) y empinadas (60-90°) |
| Litología carbonatada | Tipo de roca |
| | Estratificación |
| | Intemperismo |
| | Color |
| | Dureza Mohs |
| | Dureza Schmidt |
| | Porosidad |
| | Contenido fósil |
| | Estructuras menores |
| | Abundancia |
| | Densidad |
| | Dispersión azimutal |
| | Longitud |
| | Caliza <i>Wackestone</i> (Dunham, 1962) (M8,M9) |
| | Masiva 3-5m (M8,M9) |
| | No (M8,M9) |
| | Gris claro (M8,M9) |
| | 4 (M8,M9) |
| | 19 (n=9) (M9) |
| | Baja 4.3% (M9) |
| | Gasterópodos de la familia Nerineidae (Zittel, 1873) |
| | Foraminíferos de la familia Miliolidae |
| | Costras calcáreas (M8,M9) |
| Lineamientos | 51 |
| | 4.07 Lin/Km ² |
| | Media (R-mag=0.31) |
| | Se extienden por más de 3.9Km |

| | | | |
|--|---------------------------------|---|------------|
| | Orientación preferente | Primaria NE-SW Secundaria NW-SE | |
| | Clases de mayor frecuencia (Az) | 10-20,20-30,30-40,140-150,170-180 (5) | |
| Depresiones Kársticas | Abundancia | 1 | |
| | Densidad | 0.08 Dk/Km ² | |
| | Geometría | Pequeñas y redondeadas | |
| | Distribución | Regular | |
| | Longitud | Rango | 148m x 69m |
| | | Media | 148m x 69m |
| | Tipo evolutivo | Dolina | 1 |
| | | Polje | 0 |
| | Orden de escurrimiento | 0 | 0 |
| | | 1 | 1 |
| 2 | | 0 | |
| 3 | | 0 | |
| Colinas Kársticas Residuales | Abundancia | 97 | |
| | Densidad | 7.74 Ckr/Km ² | |
| | Geometría horizontal | Alargadas y redondeadas | |
| | Distribución | Agrupadas o encadenadas paralelamente a los lineamientos | |
| | Altura | Rango | 10-180m |
| | | Media | 80m |
| | Tipo | Cúpula | 0 |
| | | Cono | 76 |
| | | Mogote | 12 |
| | | Torre | 9 |
| Proceso geomorfológico | Dominante | Aplanamiento por corrosión | |
| | Subdominantes | Disolución Acumulación detrítica en función de la pendiente regional Erosión lineal en función del fracturamiento regional | |
| Factores de desarrollo kárstico | Primario | Pendiente regional | |
| | Secundario | Condiciones climáticas | |
| | Terciario | Litología | |
| | Cuaternario | Estructura geológica | |
| Evolución | Hipótesis | La presencia de cuevas activas basales y cavidades abandonadas en múltiples niveles de las torres y mogotes de ésta área residual, hablan evidentemente de la dinámica del nivel base de disolución. Posiblemente se trate del área kárstica más antigua del conjunto, siendo precisamente esta la que ha sido testigo de todos los procesos geomorfológicos que afectan a la región. | |
| | Evidencias paleokársticas | Amplias planicies de corrosión con ondulaciones acumulativas, cuevas activas basales y cuevas abandonadas en mogotes y torres, costras calcáreas y corredores de control estructural. | |
| Determinación taxonómica del paisaje kárstico | Género | <i>Karst residual</i> (Haryono, y otros, 2004) | |
| | Tipo | <i>Karst residual cónico</i> (Haryono, y otros, 2004) | |
| | Subtipo | <i>Karst residual cónico con mogotes y torres subdominantes</i> (Peña Ramírez, 2012) | |
| Localidades de referencia | Género | Homotipo <i>Karst residual</i> (Haryono, y otros, 2004) Gunung Sewu, Indonesia | |
| | Tipo | Holotipo <i>Karst residual cónico</i> (Haryono, y otros, 2004) Gunung Sewu, Indonesia | |
| | Homotipo | <i>Karst residual cónico</i> (Peña Ramírez, 2012) Punta de la Sierra, Cuba | |



Figura 163. Conos representativos del *Karst residual cónico* Poaná
Fotografía de campo



Figura 164. Torre y cono representativos del *Karst residual cónico* Poaná
Fotografía de campo



Figura 165. Mogote y conos en Ejido Poaná
Fotografía de campo



Figura 166. Mogote kárstico con cuevas abandonadas y estratificación masiva en Ejido Poaná
Fotografía de campo



Figura 167. Costras calcáreas y actividad disolutiva en la base de una torre kárstica (O8)
Fotografía de campo



Figura 168. Paredes verticales de torres y mogotes en Dos Cerros, Ejido Poaná
Fotografía de campo

4.1.9 KARST LABERÍNTICO CÓNICO SIERRA POANÁ OESTE

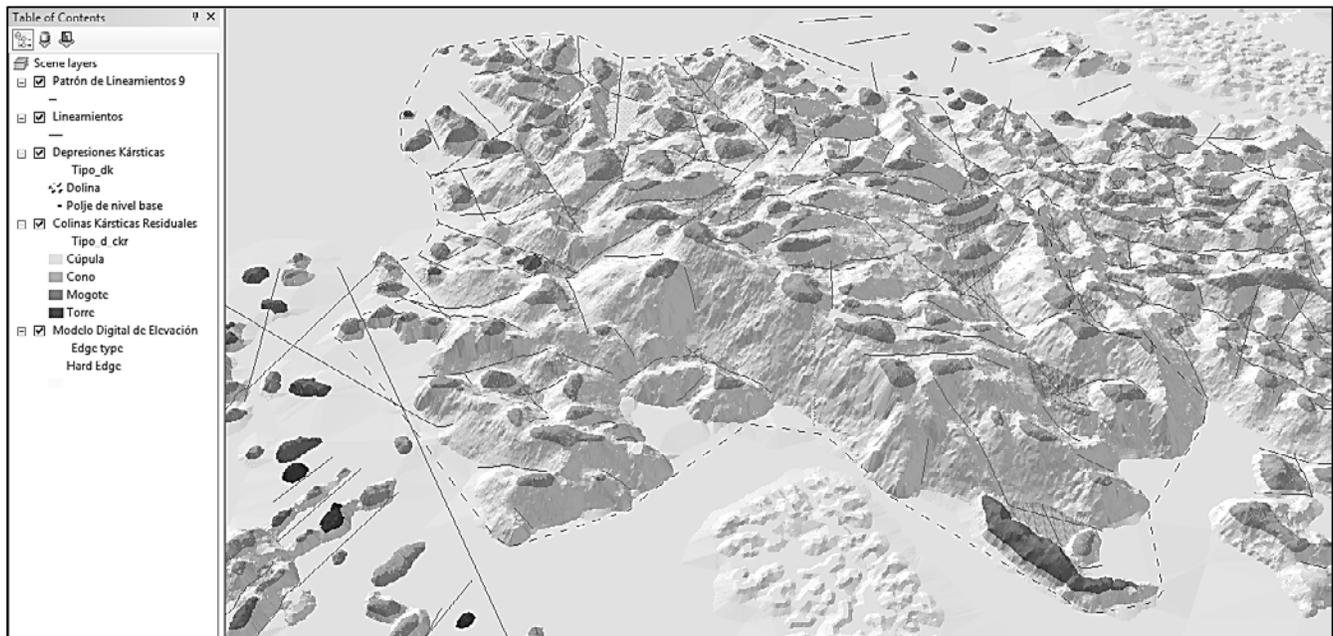


Figura 169. Modelo digital del Karst laberíntico cónico Sierra Poaná Oeste

| | | |
|---|--|--|
| Patrón de lineamientos | 9 | |
| Tipo de patrón de lineamientos | Paralelos | |
| Área | 18.22Km ² | |
| Estructura geológica | Anticlinal | |
| Pendiente regional | NE-SW | |
| Sistema de denudación kárstica | Autogénico-abierto | |
| Grado de karstificación | Medio (O7) | |
| Erosión | Vertical Horizontal | Media (O7) Media (O7) |
| Nivel base de disolución | Posición Dinámica | Inferior, a nivel Estable |
| Temperatura | | 25° casi constante |
| Grado de conservación forestal | | Alto (Natural y Cultural) (O7) |
| Drenaje superficial | Abundancia Geometría Orientación | Media Valles en v o encajonados, rectilíneos o meándricos, paralelos (O7) En función del fracturamiento y la pendiente regional: NW-SE, NE-SW (O7) |
| | Descarga | En cantiles, ponores, dolinas, poljes y planicies de corrosión |
| | Condiciones de humedad | Mayormente húmedo |
| | Escorrentía | Intermitente, torrencial (O7) |
| | Agua de infiltración | - |
| Control estructural (vías de disolución) | | Alto. Caracterizado por dos series de valles de fracturamiento controlado: NW-SE, NE-SW |
| Pendiente del relieve | | Suaves (0-40°), moderadas (40-60°), y empinadas (60-90°) |
| Litología carbonatada | Tipo de roca Estratificación | Caliza <i>Mudstone</i> (Dunham, 1962) (M6,M7) Fina 0.05-1m (M6) Media 0.5-1.5m (M7) |
| | Intemperismo | Si (M6) No (M7) |
| | Color | Gris oscuro (M6,M7) |
| | Dureza Mohs | 3.5 (M6,M7) |
| | Dureza Schmidt | 13.6 (n=9) (M6) 14 (n=9) (M7) |
| | Porosidad | Media 10% (M6), 6.5% (M7) |
| | Contenido fósil | No evidente |
| | Estructuras menores | Karren (M6,M7) |
| Lineamientos | Abundancia | 111 |

| | | | | |
|--|---------------------------------|----------|---|-------------------|
| | Densidad | | 6.09 Lin/Km ² | |
| | Dispersión azimuthal | | Alta (R-mag=0.19) | |
| | Longitud | | Se extienden por más de 3.9Km | |
| | Orientación preferente | | Primaria NW-SE Secundaria NE-SW | |
| | Clases de mayor frecuencia (Az) | | 140-150,150-160,50-60,80-90 (4) | |
| Depresiones Kársticas | Abundancia | | 26 | |
| | Densidad | | 1.43 Dk/Km ² | |
| | Geometría | | Grandes y alargadas | |
| | Distribución | | Alineadas | |
| | Longitud | Rango | | 60-921m x 20-274m |
| | | Media | | 331m x 96m |
| | Tipo evolutivo | Dolina | | 25 |
| | | Polje | | 1 de nivel base |
| | Orden de escurrimiento | 0 | | 1 |
| | | 1 | | 16 |
| 2 | | | 8 | |
| 3 | | | 1 | |
| Colinas Kársticas Residuales | Abundancia | | 118 | |
| | Densidad | | 6.47 Ckr/Km ² | |
| | Geometría horizontal | | Mayormente alargadas | |
| | Distribución | | Regular o encadenadas paralelamente a los lineamientos | |
| | Altura | Rango | | 5-155m |
| | | Media | | 47m |
| | Tipo | Cúpula | | 3 |
| | | Cono | | 111 |
| Mogote | | | 4 | |
| | Torre | | 0 | |
| Proceso geomorfológico | Dominante | | Erosión lineal en función del fracturamiento regional | |
| | Subdominantes | | Disolución Erosión fluvial en función de la pendiente regional Aplanamiento por corrosión | |
| Factores de desarrollo kárstico | Primario | | Estructura geológica | |
| | Secundario | | Litología | |
| | Terciario | | Pendiente regional | |
| | Cuaternario | | Condiciones climáticas | |
| Evolución | Hipótesis | | Los patrones de lineamientos 9,13 y 14, han sido probablemente los menos susceptibles al fracturamiento reciente (Mioceno-Plioceno). Además, es evidente su evolución periférica a karst residual, zonas que han alcanzado el nivel base de disolución. | |
| | Evidencias paleokársticas | | Orientación primaria de lineamientos NW-SE, y presencia de poljes de nivel base y planicies de corrosión periféricas. | |
| Determinación taxonómica del paisaje kárstico | Género | | <i>Karst laberíntico</i> (Brook, y otros, 1978) | |
| | Tipo | | <i>Karst laberíntico cónico</i> (Haryono, y otros, 2004) | |
| | Subtipo | | <i>Karst laberíntico cónico con mogotes y cúpulas subdominantes</i> (Peña Ramírez, 2012) | |
| Localidades de referencia | Género | Homotipo | <i>Karst laberíntico</i> (Brook, y otros, 1978) Montañas Estrella, Nueva Guinea | |
| | | Holotipo | <i>Karst laberíntico cónico</i> (Haryono, y otros, 2004) Gunung Sewu, Indonesia | |
| | | Homotipo | <i>Karst laberíntico cónico</i> (Haryono, y otros, 2004) Valle Fengcong | |



Figura 170. Vista sur del *Karst laberíntico cónico* Sierra Poaná Oeste
Fotografía de Campo



Figura 171. Corredores kársticos y flancos residuales al norte del *Karst laberíntico cónico* Sierra Poaná Oeste
Fotografía de Campo



Figura 172. Conos kársticos residuales en el flanco norte del *Karst laberíntico cónico* Sierra Poaná Oeste
Fotografía de Campo



Figura 173. Planos de estratificación en el *Karst laberíntico cónico* Sierra Poaná Oeste
Fotografía de Campo



Figura 174. Vista longitudinal del corredor kárstico dispuesto a lo largo del polje de nivel base al norte del *Karst laberíntico cónico* Sierra Poaná Oeste
Fotografía de Campo



Figura 175. Karren en el polje de nivel base al norte del *Karst laberíntico cónico* Sierra Poaná Oeste
Fotografía de Campo

4.1.10 KARST RESIDUAL CÓNICO LOMAS ALEGRES TERCERA SECCIÓN (SAN ANTONIO)

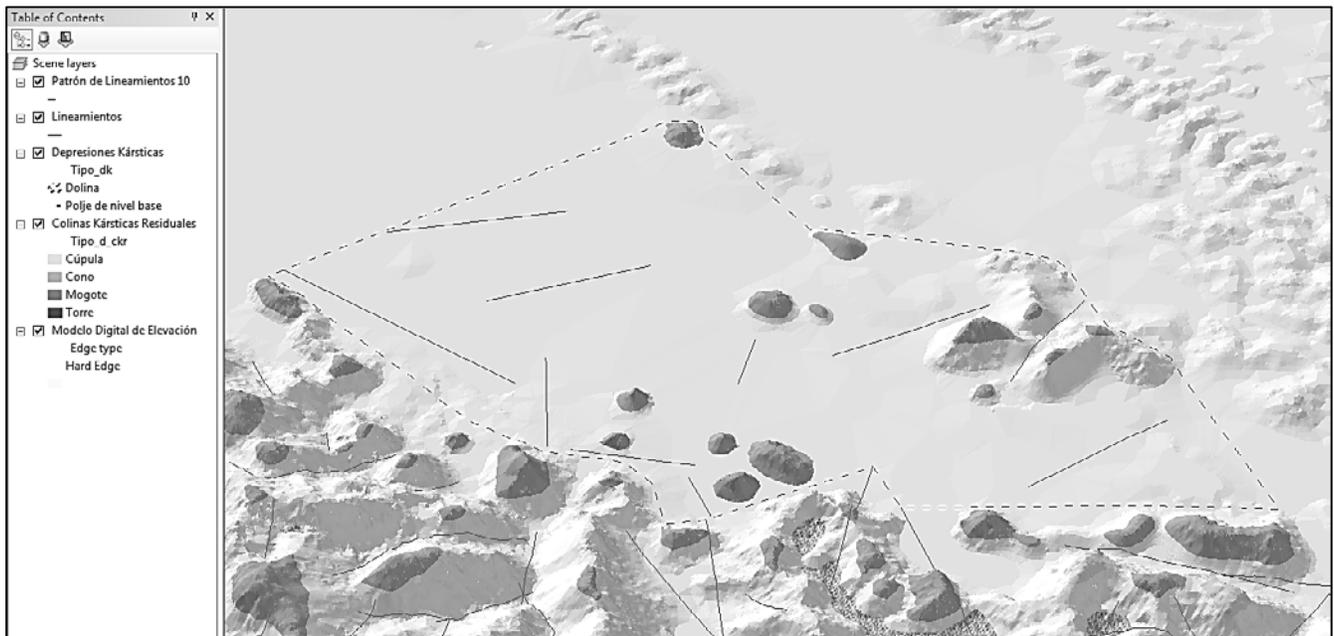


Figura 176. Modelo digital del *Karst residual cónico* Lomas Alegres Tercera Sección (San Antonio)

| | | |
|---|------------------------|--|
| Patrón de lineamientos | | 10 |
| Tipo de patrón de lineamientos | | Aislados |
| Área | | 3.66Km ² |
| Estructura geológica | | Sinclinal |
| Pendiente regional | | NE |
| Sistema de denudación kárstica | | Mixto |
| Grado de karstificación | | Alto |
| Erosión | Vertical | Baja |
| | Horizontal | Alta |
| Nivel base de disolución | Posición | A nivel |
| | Dinámica | Estable |
| Temperatura | | 25° casi constante |
| Grado de conservación forestal | | Alto (Natural y Cultural) |
| Drenaje superficial | Abundancia | Baja |
| | Geometría | Valles amplios, meándrico |
| | Orientación | En función del fracturamiento regional: NE-SW |
| | Descarga | En planicies de corrosión |
| | Condiciones de humedad | Mayormente húmedo |
| | Escorrentía | Intermitente, torrencial, perenne |
| | Agua de infiltración | - |
| Control estructural (vías de disolución) | | Alto. Caracterizado por una serie de valles fragmentados de fracturamiento controlado: NE-SW |
| Pendiente del relieve | | Suaves (0-40°), moderadas (40-60°), y en algunos casos empinadas (60-90°) |
| Litología carbonatada | Tipo de roca | Caliza |
| | Estratificación | - |
| | Intemperismo | - |
| | Color | - |
| | Dureza Mohs | - |
| | Dureza Schmidt | - |
| | Porosidad | - |
| | Contenido fósil | - |
| | Estructuras menores | - |
| Lineamientos | Abundancia | 10 |
| | Densidad | 2.73 Lin/Km ² |
| | Dispersión azimutal | Media (R-mag=0.31) |
| | Longitud | Se extienden por más de 0.9Km |

| | | | |
|--|---------------------------------|---|--------|
| | Orientación preferente | Primaria NE-SW | |
| | Clases de mayor frecuencia (Az) | 70-80 (1) | |
| Depresiones Kársticas | Abundancia | 0 | |
| | Densidad | 0 Dk/Km ² | |
| | Geometría | - | |
| | Distribución | - | |
| | Longitud | Rango | - |
| | | Media | - |
| | Tipo evolutivo | Dolina | - |
| | | Polje | - |
| | Orden de escurrimiento | 0 | - |
| | | 1 | - |
| 2 | | - | |
| 3 | | - | |
| Colinas Kársticas Residuales | Abundancia | 14 | |
| | Densidad | 3.83 Ckr/Km ² | |
| | Geometría horizontal | Mayormente redondeadas | |
| | Distribución | Aisladas o agrupadas | |
| | Altura | Rango | 10-60m |
| | | Media | 32m |
| | Tipo | Cúpula | 0 |
| | | Cono | 14 |
| Mogote | | 0 | |
| Torre | | 0 | |
| Proceso geomorfológico | Dominante | Aplanamiento por corrosión | |
| | Subdominantes | Disolución Acumulación detrítica en función de la pendiente regional | |
| Factores de desarrollo kárstico | Primario | Pendiente regional | |
| | Secundario | Condiciones climáticas | |
| | Terciario | Litología | |
| | Cuaternario | Estructura geológica | |
| Evolución | Hipótesis | El desarrollo kárstico de las colinas residuales de esta área es menor en comparación con el del <i>Karst residual cónico</i> Poaná, esto probablemente se debe a la gran actividad acumulativa asociada a los aportes hídricos superficiales provenientes de la vertiente norte de la Sierra Poaná y alrededores. Hecho que reduce en magnitud el aplanamiento por corrosión y con ello el desarrollo vertical de las colinas. | |
| | Evidencias paleokársticas | Posición respecto a otros patrones de lineamientos, orientación de las alineaciones, y altura media de las colinas kársticas residuales de 32m. | |
| Determinación taxonómica del paisaje kárstico | Género | <i>Karst residual</i> (Haryono, y otros, 2004) | |
| | Tipo | <i>Karst residual cónico</i> (Haryono, y otros, 2004) | |
| Localidades de referencia | Género | Homotipo <i>Karst residual</i> (Haryono, y otros, 2004) Gunung Sewu, Indonesia | |
| | Tipo | Holotipo <i>Karst residual cónico</i> (Haryono, y otros, 2004) Gunung Sewu, Indonesia | |
| | | Homotipo <i>Karst residual cónico</i> (Haryono, y otros, 2004) Gunung Sewu, Indonesia | |



**Figura 177. Vista noroeste del *Karst residual cónico* Lomas Alegres Tercera Sección (San Antonio)
(Al frente izquierda)
Fotografía de Campo**

4.1.11 FLUVIOKARST ACTIVO CÓNICO ARROYO SIERRA POANÁ

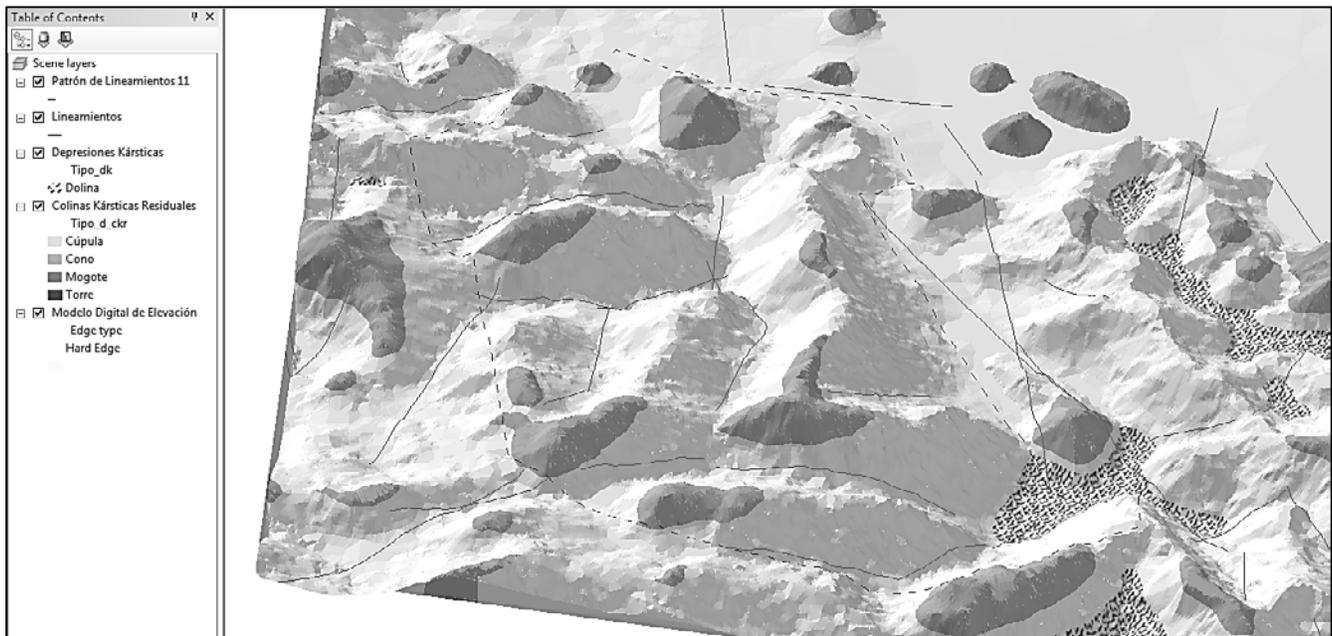


Figura 178. Modelo digital del *Fluviokarst activo cónico* Arroyo Sierra Poaná

| | | |
|---|--|---|
| Patrón de lineamientos | 11 | |
| Tipo de patrón de lineamientos | Dendrítico | |
| Área | 1.62Km ² | |
| Estructura geológica | Anticlinal | |
| Pendiente regional | NE | |
| Sistema de denudación kárstica | Autogénico-abierto | |
| Grado de karstificación | Medio | |
| Erosión | Vertical Horizontal | Media Media |
| Nivel base de disolución | Posición Dinámica | Inferior Estable |
| Temperatura | 25° casi constante | |
| Grado de conservación forestal | Alto (Natural y Cultural) | |
| Drenaje superficial | Abundancia Geometría Orientación Descarga Condiciones de humedad Escorrentía Agua de infiltración | Alta Valles en v, ciegos y semiciegos, dendrítico En función de la pendiente y fracturamiento regional: NE-SW En cantiles, ponores, y planicies de corrosión Mayormente húmedo Intermitente, torrencial - |
| Control estructural (vías de disolución) | Medio. Caracterizado por una serie de valles de fracturamiento controlado: NE-SW | |
| Pendiente del relieve | Suaves (0-40°) y moderadas (40-60°) | |
| Litología carbonatada | Tipo de roca Estratificación Intemperismo Color Dureza Mohs Dureza Schmidt Porosidad Contenido fósil Estructuras menores | Caliza-Lutita (Islas Tenorio, y otros, 2005) - - - - - - - |
| Lineamientos | Abundancia Densidad Dispersión azimutal Longitud Orientación preferente | 16 9.86 Lin/Km ² Media (R-mag=0.53) Se extienden por más de 0.6Km Primaria NE-SW |

| | | | |
|--|---------------------------------|--|-------------|
| | Clases de mayor frecuencia (Az) | 0-10,10-20,30-40,40-50,50-60,70-80,80-90 (7) | |
| Depresiones Kársticas | Abundancia | 1 | |
| | Densidad | 0.62 Dk/Km ² | |
| | Geometría | Pequeña y redondeada | |
| | Distribución | Periférica | |
| | Longitud | Rango | 549m x 176m |
| | | Media | 549m x 176m |
| | Tipo evolutivo | Dolina | 1 |
| | | Polje | 0 |
| | Orden de escurrimiento | 0 | 0 |
| | | 1 | 0 |
| 2 | | 0 | |
| | 3 | 1 | |
| Colinas Kársticas Residuales | Abundancia | 11 | |
| | Densidad | 6.78 Ckr/Km ² | |
| | Geometría horizontal | Mayormente alargadas | |
| | Distribución | Periférica | |
| | Altura | Rango | 15-70m |
| | | Media | 32m |
| | Tipo | Cúpula | 0 |
| | | Cono | 11 |
| Mogote | | 0 | |
| | Torre | 0 | |
| Proceso geomorfológico | Dominante | Erosión fluvial en función de la pendiente regional | |
| | Subdominantes | Erosión lineal en función del fracturamiento regional Disolución Aplanamiento por corrosión | |
| Factores de desarrollo kárstico | Primario | Pendiente regional | |
| | Secundario | Condiciones climáticas | |
| | Terciario | Estructura geológica | |
| | Cuaternario | Litología | |
| Evolución | Hipótesis | Posiblemente esta área fluviokárstica (pl11), asociadas al bloque laberíntico (pl2) debe su condición a procesos relacionados con el gradiente topográfico y oscilaciones paleoclimáticas. | |
| | Evidencias paleokársticas | El gradiente topográfico de la Sierra Poaná es menor en su costado norte, sin embargo, una buena parte del líquido captado en la sima fluye hacia el área en cuestión, lo cual, sumado a las condiciones climáticas contemporáneas del área, ha dado pie a que las lluvias torrenciales de temporal superen la capacidad de captación del sistema kárstico. En consecuencia se ha desarrollado una cuenca fluvial de dimensión considerable. | |
| Determinación taxonómica del paisaje kárstico | Género | <i>Fluviokarst activo</i> (Gunn, 2004) | |
| | Tipo | <i>Fluviokarst activo cónico</i> (Peña Ramírez, 2012) | |
| Localidades de referencia | Género | Homotipo <i>Fluviokarst activo</i> (Miller, (1982) 2007) Belice | |
| | Tipo | Holotipo <i>Fluviokarst activo cónico</i> (Peña Ramírez, 2012) Sierra de Tabasco, México | |

4.1.12 KARST POLIGONAL CÓNICO SIERRA POANÁ ESTE

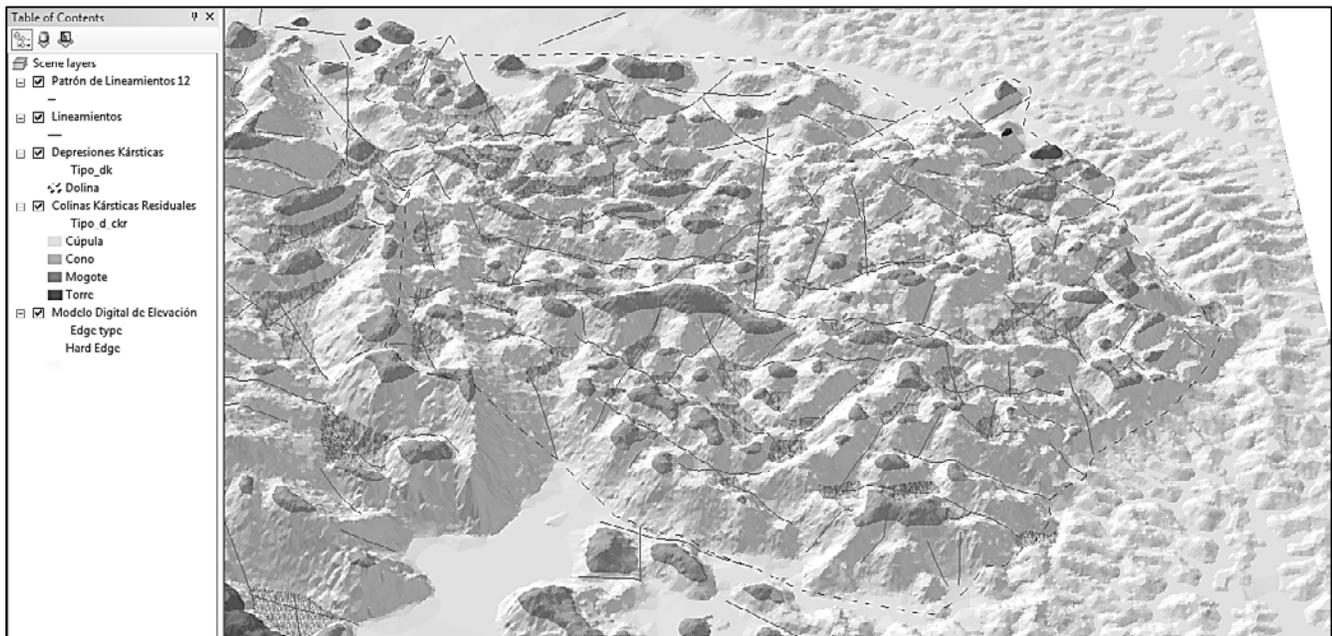


Figura 179. Modelo digital del Karst poligonal cónico Sierra Poaná Este

| | | |
|---|------------------------|--|
| Patrón de lineamientos | | 12 |
| Tipo de patrón de lineamientos | | Entrecruzados |
| Área | | 12.35Km ² |
| Estructura geológica | | Anticlinal |
| Pendiente regional | | NE-SW |
| Sistema de denudación kárstica | | Autogénico-abierto |
| Grado de karstificación | | Medio (O6) |
| Erosión | Vertical | Media (O6) |
| | Horizontal | Media (O6) |
| Nivel base de disolución | Posición | Inferior |
| | Dinámica | Estable |
| Temperatura | | 25° casi constante |
| Grado de conservación forestal | | Medio (Natural y Cultural) (O6) |
| Drenaje superficial | Abundancia | Baja |
| | Geometría | Malla poligonal de captación centrípeta con valles meándricos o dendríticos fragmentados |
| | Orientación | Desordenado y en función del fracturamiento: NE-SW, NW-SE |
| | Descarga | En cantiles, ponores, dolinas y planicies de corrosión |
| | Condiciones de humedad | Mayormente húmedo |
| | Esorrentía | Intermitente, torrencial |
| | Agua de infiltración | - |
| Control estructural (vías de disolución) | | Alto. Caracterizado por dos series de valles fragmentados de fracturamiento controlado: NE-SW, NW-SE |
| Pendiente del relieve | | Suaves (0-40°), moderadas (40-60°), y en algunos casos empinadas (60-90°) |
| Litología carbonatada | Tipo de roca | Caliza-Lutita (Islas Tenorio, y otros, 2005) Lutita calcárea (M5) |
| | Estratificación | Muy fina (M5) |
| | Intemperismo | No (M5) |
| | Color | Gris oscuro (M5) |
| | Dureza Mohs | 3.5 (M5) |
| | Dureza Schmidt | 14 (n=9) (M5) |
| | Porosidad | Media 10% (M5) |
| | Contenido fósil | No evidente |
| | Estructuras menores | Campo de lapiaz (M5) |
| Lineamientos | Abundancia | 132 |
| | Densidad | 10.69 Lin/Km ² |

| | | | |
|--|---------------------------------|---|--|
| | Dispersión azimutal | Alta (R-mag=0.02) | |
| | Longitud | Se extienden por más de 1.4Km | |
| | Orientación preferente | Primaria NE-SW Secundaria NW-SE | |
| | Clases de mayor frecuencia (Az) | 30-40,40-50,90-100,150-160 (4) | |
| Depresiones Kársticas | Abundancia | 72 | |
| | Densidad | 5.83 Dk/Km ² | |
| | Geometría | Medianas, alargadas y redondeadas | |
| | Distribución | Regular | |
| | Longitud | Rango | 55-839m x 25-176m |
| | | Media | 273m x 97m |
| | Tipo evolutivo | Dolina | 72 |
| | | Polje | 0 |
| | Orden de escurrimiento | 0 | 5 |
| | | 1 | 44 |
| 2 | | 22 | |
| 3 | | 1 | |
| Colinas Kársticas Residuales | Abundancia | 108 | |
| | Densidad | 8.75 Ckr/Km ² | |
| | Geometría horizontal | Alargadas y redondeadas | |
| | Distribución | Regular o encadenadas paralelamente a los lineamientos | |
| | Altura | Rango | 10-120m |
| | | Media | 62m |
| | Tipo | Cúpula | 11 |
| | | Cono | 95 |
| Mogote | | 1 | |
| | Torre | 1 | |
| Proceso geomorfológico | Dominante | Disolución | |
| | Subdominantes | Erosión lineal en función del fracturamiento regional Erosión fluvial en función de la pendiente regional Aplanamiento por corrosión | |
| Factores de desarrollo kárstico | Primario | Litología | |
| | Secundario | Estructura geológica | |
| | Terciario | Pendiente regional | |
| | Cuaternario | Condiciones climáticas | |
| Evolución | Hipótesis | Se trata muy probablemente del <i>Karst poligonal</i> mejor desarrollado de la región. | |
| | Evidencias paleokársticas | Posición elevada en dos bloques poco inclinados y bien diferenciados (norte y sur), susceptibilidad equitativa a los dos sistemas de fracturamiento regional (NW-SE y NE-SW), y litología probablemente menos resistente en comparación con la de las áreas kársticas circundantes. | |
| Determinación taxonómica del paisaje kárstico | Género | <i>Karst poligonal</i> (Williams, 1972) | |
| | Tipo | <i>Karst poligonal cónico</i> (Peña Ramírez, 2012) | |
| | Subtipo | <i>Karst poligonal cónico con cúpulas, mogote y torre subdominantes</i> (Peña Ramírez, 2012) | |
| Localidades de referencia | Género | Homotipo <i>Karst poligonal</i> (Williams, 1972) Papúa Nueva Guinea | |
| | Tipo | Holotipo | <i>Karst poligonal cónico</i> (Peña Ramírez, 2012) Sierra de Tabasco, México |
| | | Homotipo | <i>Karst poligonal cónico</i> (Williams, 1972) (Peña Ramírez, 2012) Papúa Nueva Guinea |



Figura 180. Vista sur del *Karst poligonal cónico* Sierra Poaná Este
Nótese el desnivel entre éste y el bloque laberíntico adyacente al oeste
Fotografía de Campo



Figura 181. Vista noreste del *Karst poligonal cónico* Sierra Poaná Este
Fotografía de Campo



Figura 182. Conos, torre y mogote representativos del *Karst poligonal cónico* Sierra Poaná Este
Fotografía de Campo



Figura 183. Vista este del *Karst poligonal cónico* Sierra Poaná Este
Fotografía de Campo

4.1.13 KARST LABERÍNTICO CÓNICO CERRO CHILE

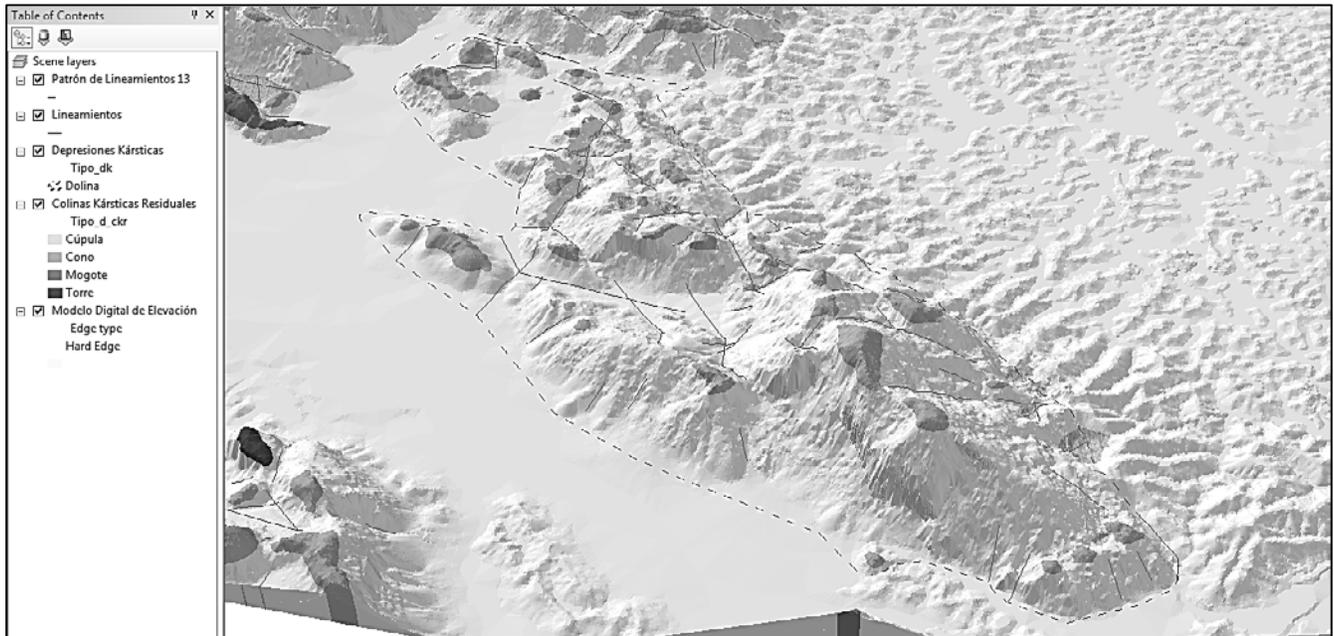


Figura 184. Modelo digital del Karst laberíntico cónico Cerro Chile

| | | |
|---|--|--|
| Patrón de lineamientos | 13 | |
| Tipo de patrón de lineamientos | Paralelos | |
| Área | 8.87Km ² | |
| Estructura geológica | Anticlinal | |
| Pendiente regional | NE-SW | |
| Sistema de denudación kárstica | Autogénico-abierto | |
| Grado de karstificación | Medio | |
| Erosión | Vertical Horizontal | Media Media |
| Nivel base de disolución | Posición Dinámica | Inferior Estable |
| Temperatura | 25° casi constante | |
| Grado de conservación forestal | Alto (Natural y Cultural) | |
| Drenaje superficial | Abundancia Geometría Orientación Descarga Condiciones de humedad Escorrentía Agua de infiltración | Media Valles en v o encajonados, rectilíneos o meándricos, paralelos En función del fracturamiento y la pendiente regional: NW-SE, NE-SW En cantiles, ponores, dolinas y planicies de corrosión Mayormente húmedo Intermitente, torrencial - |
| Control estructural (vías de disolución) | Alto. Caracterizado por dos series de valles de fracturamiento controlado: NW-SE, NE-SW | |
| Pendiente del relieve | Suaves (0-40°), moderadas (40-60°), y empinadas (60-90°) | |
| Litología carbonatada | Tipo de roca Estratificación Intemperismo Color Dureza Mohs Dureza Schmidt Porosidad Contenido fósil Estructuras menores | Caliza-Lutita (Islas Tenorio, y otros, 2005) - - - - - - - |
| Lineamientos | Abundancia Densidad Dispersión azimutal Longitud Orientación preferente | 70 7.89 Lin/Km ² Alta (R-mag=0.07) Se extienden por más de 0.9Km Primaria NW-SE |

| | | | |
|--|---------------------------|----------|---|
| | | | Secundaria NE-SW |
| Clases de mayor frecuencia (Az) | | | 90-100,140-150,150-160,30-40,40-50,50-60 (6) |
| Depresiones Kársticas | Abundancia | | 15 |
| | Densidad | | 1.69 Dk/Km ² |
| | Geometría | | Medianas, alargadas y redondeadas |
| | Distribución | | Central y periférica |
| | Longitud | Rango | 47-491m x 32-210m |
| | | Media | 145m x 62m |
| | Tipo evolutivo | Dolina | 15 |
| | | Polje | 0 |
| | Orden de escurrimiento | 0 | 1 |
| | | 1 | 7 |
| 2 | | 7 | |
| 3 | | 0 | |
| Colinas Kársticas Residuales | Abundancia | | 40 |
| | Densidad | | 4.51 Ckr/Km ² |
| | Geometría horizontal | | Mayormente alargadas |
| | Distribución | | Aisladas o encadenadas paralelamente a los lineamientos |
| | Altura | Rango | 5-85m |
| | | Media | 29m |
| | Tipo | Cúpula | 1 |
| | | Cono | 39 |
| Mogote | | 0 | |
| Torre | | 0 | |
| Proceso geomorfológico | Dominante | | Erosión lineal en función del fracturamiento regional |
| | Subdominantes | | Disolución Erosión fluvial en función de la pendiente regional Aplanamiento por corrosión |
| Factores de desarrollo kárstico | Primario | | Estructura geológica |
| | Secundario | | Litología |
| | Terciario | | Pendiente regional |
| | Cuaternario | | Condiciones climáticas |
| Evolución | Hipótesis | | Los patrones de lineamientos 9,13 y 14, han sido probablemente los menos susceptibles al fracturamiento reciente (Mioceno-Plioceno). Además, es evidente su evolución periférica a karst residual, zonas que han alcanzado el nivel base de disolución. |
| | Evidencias paleokársticas | | Orientación primaria de lineamientos NW-SE, y presencia de poljes de nivel base y planicies de corrosión periféricas. |
| Determinación taxonómica del paisaje kárstico | Género | | <i>Karst laberíntico</i> (Brook, y otros, 1978) |
| | Tipo | | <i>Karst laberíntico cónico</i> (Haryono, y otros, 2004) |
| | Subtipo | | <i>Karst laberíntico cónico con cúpula subdominante</i> (Peña Ramírez, 2012) |
| Localidades de referencia | Género | Homotipo | <i>Karst laberíntico</i> (Brook, y otros, 1978) Montañas Estrella, Nueva Guinea |
| | | Tipo | Holotipo <i>Karst laberíntico cónico</i> (Haryono, y otros, 2004) Gunung Sewu, Indonesia |
| | | Homotipo | <i>Karst laberíntico cónico</i> (Haryono, y otros, 2004) Valle Fengcong |



Figura 185. Conos representativos del *Karst laberíntico cónico* Cerro Chile
Fotografía de Campo

4.1.14 KARST LABERÍNTICO CÓNICO CERRO MICO

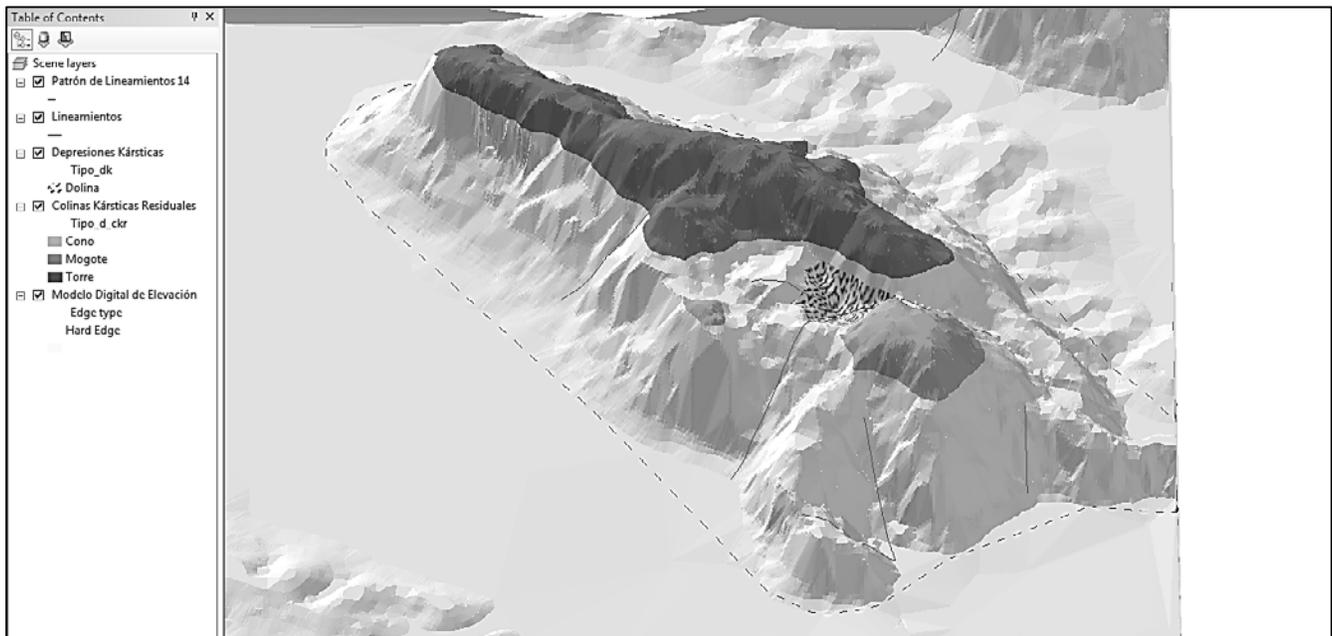


Figura 186. Modelo digital del *Karst laberíntico cónico* Cerro Mico

| | | |
|---|--|--|
| Patrón de lineamientos | 14 | |
| Tipo de patrón de lineamientos | Paralelos | |
| Área | 0.97Km ² | |
| Estructura geológica | Anticlinal | |
| Pendiente regional | NE-SW | |
| Sistema de denudación kárstica | Autogénico-abierto | |
| Grado de karstificación | Medio | |
| Erosión | Vertical Horizontal | Media Media |
| Nivel base de disolución | Posición Dinámica | Inferior Estable |
| Temperatura | 25° casi constante | |
| Grado de conservación forestal | Alto (Natural y Cultural) | |
| Drenaje superficial | Abundancia Geometría Orientación Descarga Condiciones de humedad Escorrentía Agua de infiltración | Media Valles en v o encajonados, rectilíneos o meándricos, paralelos En función del fracturamiento y la pendiente regional: NW-SE, NE-SW En cantiles, ponores, dolinas y planicies de corrosión Mayormente húmedo Intermitente, torrencial - |
| Control estructural (vías de disolución) | Alto. Caracterizado por una serie de valles de fracturamiento controlado: NW-SE | |
| Pendiente del relieve | Suaves (0-40°), moderadas (40-60°), y empinadas (60-90°) | |
| Litología carbonatada | Tipo de roca Estratificación Intemperismo Color Dureza Mohs Dureza Schmidt Porosidad Contenido fósil Estructuras menores | Caliza-Lutita (Islas Tenorio, y otros, 2005) - - - - - - - |
| Lineamientos | Abundancia Densidad Dispersión azimutal Longitud Orientación preferente | 6 6.19 Lin/Km ² Alta (R-mag=0.24) Se extienden por más de 0.3Km Primaria NW-SE |

| | | | |
|--|---------------------------------|---|---|
| | Clases de mayor frecuencia (Az) | 90-100 (1) | |
| Depresiones Kársticas | Abundancia | 1 | |
| | Densidad | 1.03 Dk/Km ² | |
| | Geometría | Mediana y redondeada | |
| | Distribución | Central | |
| | Longitud | Rango | 168m x 120m |
| | | Media | 168m x 120m |
| | Tipo evolutivo | Dolina | 1 |
| | | Polje | 0 |
| | Orden de escurrimiento | 0 | 0 |
| | | 1 | 0 |
| 2 | | 1 | |
| | 3 | 0 | |
| Colinas Kársticas Residuales | Abundancia | 3 | |
| | Densidad | 3.09 Ckr/Km ² | |
| | Geometría horizontal | Mayormente alargadas | |
| | Distribución | Agrupadas | |
| | Altura | Rango | 10-145m |
| | | Media | 89m |
| | Tipo | Cúpula | 0 |
| | | Cono | 2 |
| Mogote | | 1 | |
| | Torre | 0 | |
| Proceso geomorfológico | Dominante | Erosión lineal en función del fracturamiento regional | |
| | Subdominantes | Disolución Erosión fluvial en función de la pendiente regional Aplanamiento por corrosión | |
| Factores de desarrollo kárstico | Primario | Estructura geológica | |
| | Secundario | Litología | |
| | Terciario | Pendiente regional | |
| | Cuaternario | Condiciones climáticas | |
| Evolución | Hipótesis | Los patrones de lineamientos 9,13 y 14, han sido probablemente los menos susceptibles al fracturamiento reciente (Mioceno-Plioceno). Además, es evidente su evolución periférica a karst residual, zonas que han alcanzado el nivel base de disolución. | |
| | Evidencias paleokársticas | Orientación primaria de lineamientos NW-SE, y presencia de poljes de nivel base y planicies de corrosión periféricas. | |
| Determinación taxonómica del paisaje kárstico | Género | <i>Karst laberíntico</i> (Brook, y otros, 1978) | |
| | Tipo | <i>Karst laberíntico cónico</i> (Haryono, y otros, 2004) | |
| | Subtipo | <i>Karst laberíntico cónico con mogote subdominante</i> (Peña Ramírez, 2012) | |
| Localidades de referencia | Género | Homotipo | <i>Karst laberíntico</i> (Brook, y otros, 1978) Montañas Estrella, Nueva Guinea |
| | | Holotipo | <i>Karst laberíntico cónico</i> (Haryono, y otros, 2004) Gunung Sewu, Indonesia |
| | Homotipo | <i>Karst laberíntico cónico</i> (Haryono, y otros, 2004) Valle Fengcong | |



Figura 187. Vista sur del *Karst laberintico cónico* Cerro Mico (al frente)
Mogote kárstico al centro izquierda y conos a la derecha
Fotografía de Campo

4.1.15 KARST LABERÍNTICO CÓNICO TAPIJULAPA

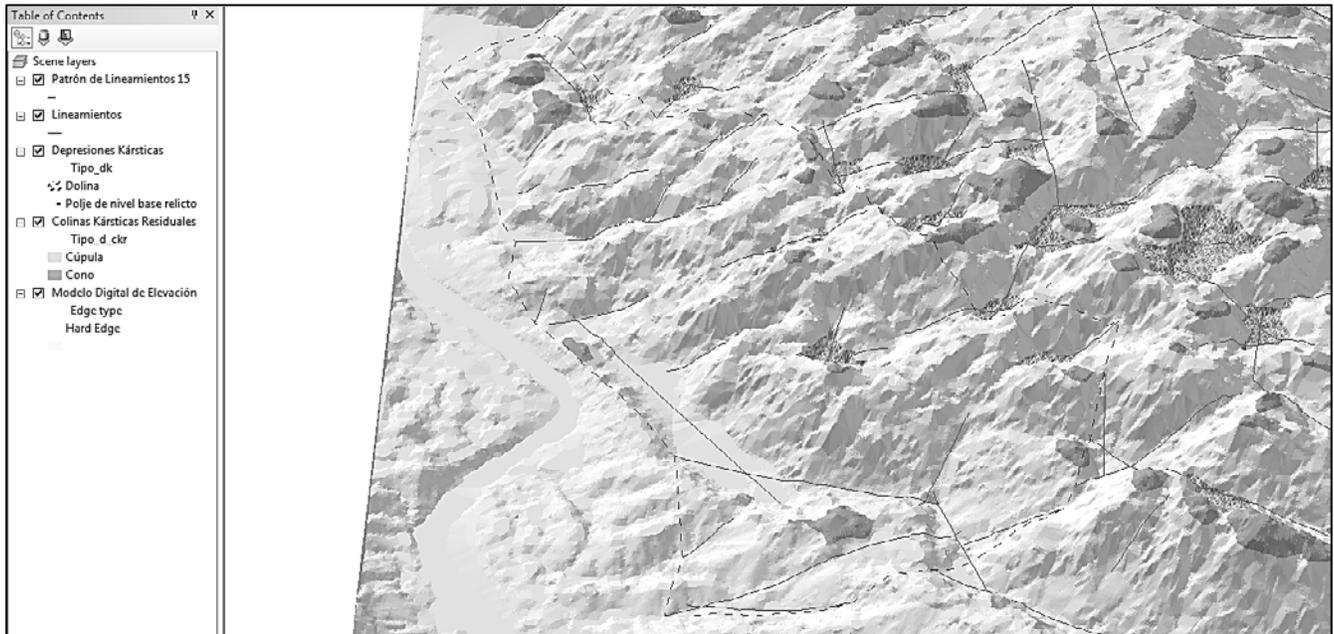


Figura 188. Modelo digital del *Karst laberíntico cónico* Tapijulapa

| | | |
|---|--|---|
| Patrón de lineamientos | 15 | |
| Tipo de patrón de lineamientos | Paralelos | |
| Área | 2.77Km ² | |
| Estructura geológica | Anticlinal cilíndrico con cierre periclinal Miraflores | |
| Pendiente regional | SW | |
| Sistema de denudación kárstica | Mixto | |
| Grado de karstificación | Medio | |
| Erosión | Vertical Horizontal | Media Media |
| Nivel base de disolución | Posición Dinámica | Inferior Estable |
| Temperatura | 26° casi constante | |
| Grado de conservación forestal | Alto (Natural y Cultural) | |
| Drenaje superficial | Abundancia Geometría Orientación Descarga Condiciones de humedad Escorrentía Agua de infiltración | Media Valles en v o encajonados, rectilíneos o meándricos, paralelos En función del fracturamiento y la pendiente regional: NE-SW En cantiles, ponores y dolinas Mayormente húmedo Intermitente, torrencial - |
| Control estructural (vías de disolución) | Alto. Caracterizado por una serie de valles de fracturamiento controlado: NE-SW | |
| Pendiente del relieve | Suaves (0-40°), moderadas (40-60°), y en algunos casos empinadas (60-90°) | |
| Litología carbonatada | Tipo de roca Estratificación Intemperismo Color Dureza Mohs Dureza Schmidt Porosidad Contenido fósil Estructuras menores | Caliza-Lutita (Islas Tenorio, y otros, 2005) - - - - - - - |
| Lineamientos | Abundancia Densidad Dispersión azimutal Longitud | 28 10.11 Lin/Km ² Alta (R-mag=0.4) Se extienden por más de 1.1Km |

| | | | |
|--|---------------------------------|--|------------------|
| | Orientación preferente | Primaria NE-SW | |
| | Clases de mayor frecuencia (Az) | 70-80,80-90 (2) | |
| Depresiones Kársticas | Abundancia | 8 | |
| | Densidad | 2.89 Dk/Km ² | |
| | Geometría | Medianas y alargadas | |
| | Distribución | Irregular | |
| | Longitud | Rango | 29-195m x 18-81m |
| | | Media | 87m x 34m |
| | Tipo evolutivo | Dolina | 8 |
| | | Polje | 0 |
| | Orden de escurrimiento | 0 | 2 |
| | | 1 | 2 |
| 2 | | 4 | |
| | 3 | 0 | |
| Colinas Kársticas Residuales | Abundancia | 12 | |
| | Densidad | 4.33 Ckr/Km ² | |
| | Geometría horizontal | Mayormente alargadas | |
| | Distribución | Aisladas o encadenadas paralelamente a los lineamientos | |
| | Altura | Rango | 10-30m |
| | | Media | 17m |
| | Tipo | Cúpula | 0 |
| | | Cono | 12 |
| Mogote | | 0 | |
| Torre | | 0 | |
| Proceso geomorfológico | Dominante | Erosión lineal en función del fracturamiento regional | |
| | Subdominantes | Disolución Erosión fluvial en función de la pendiente regional | |
| Factores de desarrollo kárstico | Primario | Estructura geológica | |
| | Secundario | Litología | |
| | Terciario | Pendiente regional | |
| | Cuaternario | Condiciones climáticas | |
| Evolución | Hipótesis | Este fragmento en su mayor parte laberíntico (pl15) se asocia con su similar Agua Escondida. Su diferenciación probablemente se deba a varios factores: posición lateral respecto al eje longitudinal del plegamiento paralelo al anticlinal Miraflores, y en consecuencia menor potencia topográfica respecto a la cima del plegamiento, aislamiento parcial de aporte hídrico alogénico, y sistema de denudación kárstica mixto. | |
| | Evidencias paleokársticas | Lineamientos paralelos con orientación primaria NE-SW | |
| Determinación taxonómica del paisaje kárstico | Género | <i>Karst laberíntico</i> (Brook, y otros, 1978) | |
| | Tipo | <i>Karst laberíntico cónico</i> (Haryono, y otros, 2004) | |
| Localidades de referencia | Género | Homotipo <i>Karst laberíntico</i> (Brook, y otros, 1978) Montañas Estrella, Nueva Guinea | |
| | Tipo | Holotipo <i>Karst laberíntico cónico</i> (Haryono, y otros, 2004) Gunung Sewu, Indonesia | |
| | | Homotipo <i>Karst laberíntico cónico</i> (Haryono, y otros, 2004) Valle Fengcong | |



Figura 189. Vista suroeste del *Karst laberíntico cónico* Tapijulapa (al frente izquierda)
Fotografía de Campo

4.1.16 KARST POLIGONAL CÓNICO SAN MANUEL

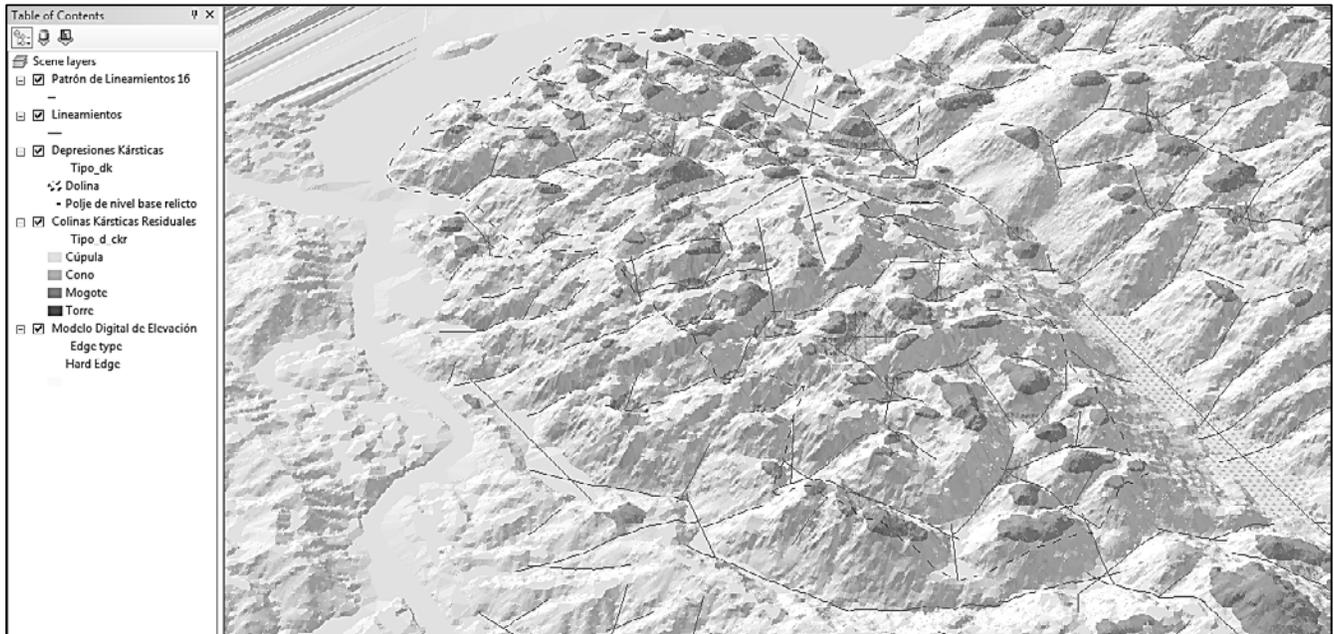


Figura 190. Modelo digital del Karst poligonal cónico San Manuel

| | | |
|---|--|---|
| Patrón de lineamientos | 16 | |
| Tipo de patrón de lineamientos | Entrecruzados | |
| Área | 8.68Km ² | |
| Estructura geológica | Anticlinal cilíndrico con cierre periclinal Miraflores | |
| Pendiente regional | NE-SW | |
| Sistema de denudación kárstica | Autogénico-abierto | |
| Grado de karstificación | Medio | |
| Erosión | Vertical Horizontal | Media Media |
| Nivel base de disolución | Posición Dinámica | Inferior Estable |
| Temperatura | 25° casi constante | |
| Grado de conservación forestal | Alto (Natural) | |
| Drenaje superficial | Abundancia Geometría Orientación Descarga Condiciones de humedad Escorrentía Agua de infiltración | Baja Malla poligonal de captación centrípeta con valles meándricos o dendríticos fragmentados Desordenado y en función del fracturamiento: NE-SW, NW-SE En cantiles, ponores, dolinas y planicies de corrosión Mayormente húmedo Intermitente, torrencial - |
| Control estructural (vías de disolución) | Alto. Caracterizado por dos series de valles fragmentados de fracturamiento controlado: NE-SW, NW-SE | |
| Pendiente del relieve | Suaves (0-40°), moderadas (40-60°), y en algunos casos empinadas (60-90°) | |
| Litología carbonatada | Tipo de roca Estratificación Intemperismo Color Dureza Mohs Dureza Schmidt Porosidad Contenido fósil Estructuras menores | Caliza-Lutita (Islas Tenorio, y otros, 2005) - - - - - - - - |
| Lineamientos | Abundancia Densidad Dispersión azimutal | 111 12.79 Lin/Km ² Alta (R-mag=0.05) |

| | | | | |
|--|---------------------------------|---|--|--|
| | Longitud | Se extienden por más de 1.1Km | | |
| | Orientación preferente | Primaria NE-SW Secundaria NW-SE | | |
| | Clases de mayor frecuencia (Az) | 60-70,130-140 (2) | | |
| Depresiones Kársticas | Abundancia | 35 | | |
| | Densidad | 4.03 Dk/Km ² | | |
| | Geometría | Medianas y alargadas | | |
| | Distribución | Regular | | |
| | Longitud | Rango | 30-538m x 17-177m | |
| | | Media | 217m x 86m | |
| | Tipo evolutivo | Dolina | 35 | |
| | | Polje | 0 | |
| | Orden de escurrimiento | 0 | 6 | |
| | | 1 | 12 | |
| 2 | | 16 | | |
| 3 | | 1 | | |
| Colinas Kársticas Residuales | Abundancia | 70 | | |
| | Densidad | 8.07 Ckr/Km ² | | |
| | Geometría horizontal | Mayormente redondeadas | | |
| | Distribución | Regular | | |
| | Altura | Rango | 10-70m | |
| | | Media | 23m | |
| | Tipo | Cúpula | 1 | |
| | | Cono | 69 | |
| Mogote | | 0 | | |
| Torre | | 0 | | |
| Proceso geomorfológico | Dominante | Disolución | | |
| | Subdominantes | Erosión lineal en función del fracturamiento regional Erosión fluvial en función de la pendiente regional Aplanamiento por corrosión | | |
| Factores de desarrollo kárstico | Primario | Litología | | |
| | Secundario | Estructura geológica | | |
| | Terciario | Pendiente regional | | |
| | Cuaternario | Condiciones climáticas | | |
| Evolución | Hipótesis | Se trata del segundo mejor desarrollado <i>Karst poligonal</i> del PEST. | | |
| | Evidencias paleokársticas | Posición central longitudinal respecto al pliegue paralelo al anticlinal Miraflores, y susceptibilidad equitativa a los dos sistemas de fracturamiento regional (NW-SE y NE-SW) | | |
| Determinación taxonómica del paisaje kárstico | Género | <i>Karst poligonal</i> (Williams, 1972) | | |
| | Tipo | <i>Karst poligonal cónico</i> (Peña Ramírez, 2012) | | |
| | Subtipo | <i>Karst poligonal cónico con cúpula subdominante</i> (Peña Ramírez, 2012) | | |
| Localidades de referencia | Género | Homotipo | <i>Karst poligonal</i> (Williams, 1972) Papúa Nueva Guinea | |
| | | Holotipo | <i>Karst poligonal cónico</i> (Peña Ramírez, 2012) Sierra de Tabasco, México | |
| | Tipo | Homotipo | <i>Karst poligonal cónico</i> (Williams, 1972) (Peña Ramírez, 2012) Papúa Nueva Guinea | |



Figura 191. Vista suroeste del *Karst poligonal cónico* San Manuel (al fondo)
Fotografía de Campo

4.1.17 FLUVIOKARST ACTIVO CÓNICO ARROYO PIEDRA NEGRA



Figura 192. Modelo digital del *Fluviokarst activo cónico* Arroyo Piedra Negra

| | | |
|---|--|--|
| Patrón de lineamientos | 17 | |
| Tipo de patrón de lineamientos | Dendrítico | |
| Área | 4.71Km ² | |
| Estructura geológica | Anticlinal cilíndrico con cierre periclinal Miraflores | |
| Pendiente regional | SW | |
| Sistema de denudación kárstica | Autogénico-abierto | |
| Grado de karstificación | Medio (O3) | |
| Erosión | Vertical Horizontal | Media (O3) Media (O3) |
| Nivel base de disolución | Posición Dinámica | Inferior Estable |
| Temperatura | 26° casi constante | |
| Grado de conservación forestal | Alto (Natural y Cultural) (Restaurada) (O3) | |
| Drenaje superficial | Abundancia Geometría Orientación | Alta Valles en v, ciegos y semiciegos, terrazas (O3), dendrítico En función de la pendiente y fracturamiento regional: NE-SW, NW-SE (O3) |
| | Descarga | En cantiles y ponores |
| | Condiciones de humedad | Mayormente húmedo |
| | Escorrentía | Intermitente, torrencial, perenne (O3) |
| | Agua de infiltración | pH6 a 27° (O3) |
| Control estructural (vías de disolución) | Medio. Caracterizado por dos series de valles de fracturamiento controlado: NE-SW, NW-SE | |
| Pendiente del relieve | Suaves (0-40°) y moderadas (40-60°) | |
| Litología carbonatada | Tipo de roca Estratificación Intemperismo Color Dureza Mohs Dureza Schmidt Porosidad Contenido fósil Estructuras menores | Caliza-Lutita (Islas Tenorio, y otros, 2005) - - - - - - - |
| Lineamientos | Abundancia Densidad Dispersión azimutal Longitud | 39 8.27 Lin/Km ² Alta (R-mag=0.13) Se extienden por más de 0.9Km |

| | | | |
|--|---------------------------------|---|------------|
| | Orientación preferente | Primaria NE-SW Secundaria NW-SE | |
| | Clases de mayor frecuencia (Az) | 10-20,70-80,90-100,120-130 (4) | |
| Depresiones Kársticas | Abundancia | 1 | |
| | Densidad | 0.21 Dk/Km ² | |
| | Geometría | Pequeña y redondeada | |
| | Distribución | Periférica | |
| | Longitud | Rango | 136m x 36m |
| | | Media | 136m x 36m |
| | Tipo evolutivo | Dolina | 1 |
| | | Polje | 0 |
| | Orden de escurrimiento | 0 | 0 |
| | | 1 | 1 |
| 2 | | 0 | |
| | 3 | 0 | |
| Colinas Kársticas Residuales | Abundancia | 8 | |
| | Densidad | 1.7 Ckr/Km ² | |
| | Geometría horizontal | Mayormente alargadas | |
| | Distribución | Periférica o agrupadas | |
| | Altura | Rango | 10-60m |
| | | Media | 25m |
| | Tipo | Cúpula | 2 |
| | | Cono | 6 |
| Mogote | | 0 | |
| | Torre | 0 | |
| Proceso geomorfológico | Dominante | Erosión fluvial en función de la pendiente regional | |
| | Subdominantes | Erosión lineal en función del fracturamiento regional Disolución | |
| Factores de desarrollo kárstico | Primario | Pendiente regional | |
| | Secundario | Condiciones climáticas | |
| | Terciario | Estructura geológica | |
| | Cuaternario | Litología | |
| Evolución | Hipótesis | Posiblemente esta área fluviokárstica (p17) deba su condición a procesos relacionados con el gradiente topográfico, oscilaciones paleoclimáticas, y particularmente alteraciones isostáticas. Es probable que el valle curvilíneo norte, se haya desarrollado tras el levantamiento tectónico del conjunto calcáreo Tapijulapa, ya que dicho evento pudo haber generado presión hídrica en el antiguo polje de nivel base, localizado tierra arriba, hallando salida en la periferia sur de la depresión. | |
| | Evidencias paleokársticas | Valle continuo en u que inicia en el parteaguas que lo divide del polje de nivel base relictos, atravesando los patrones de lineamientos 17 y 15, y desembocando en la rivera del río Tacotalpa, aporte hídrico autogénico de temporal, gradiente topográfico notable, y desarrollo de cuencas fluviales de considerables dimensiones. | |
| Determinación taxonómica del paisaje kárstico | Género | <i>Fluviokarst activo</i> (Gunn, 2004) | |
| | Tipo | <i>Fluviokarst activo cónico</i> (Peña Ramírez, 2012) | |
| | Subtipo | <i>Fluviokarst activo cónico con cúpulas subdominantes</i> (Peña Ramírez, 2012) | |
| Localidades de referencia | Género | Homotipo <i>Fluviokarst activo</i> (Miller, (1982) 2007) Belice | |
| | Tipo | Holotipo <i>Fluviokarst activo cónico</i> (Peña Ramírez, 2012) Sierra de Tabasco, México | |



Figura 193. Vista oeste del *Fluviokarst activo cónico* Arroyo Piedra Negra (al frente derecha)
Fotografía de Campo



Figura 194. Vista de la cuenca fluviokárstica noroeste
Fotografía de Campo

4.1.18 KARST LABERÍNTICO CÓNICO AGUA ESCONDIDA

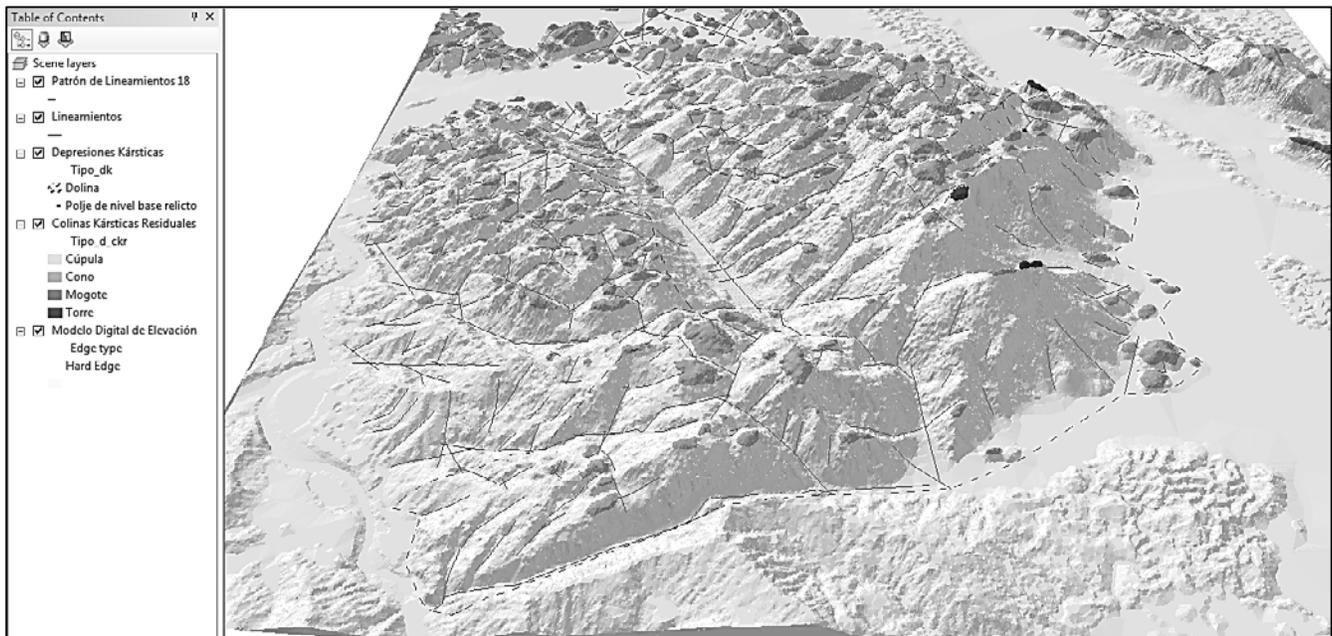


Figura 195. Modelo digital del *Karst laberíntico cónico Agua Escondida*

| | | |
|---|------------------------|---|
| Patrón de lineamientos | | 18 |
| Tipo de patrón de lineamientos | | Paralelos |
| Área | | 35.78Km ² |
| Estructura geológica | | Anticlinal cilíndrico con cierre periclinal Miraflores |
| Pendiente regional | | NE-SW |
| Sistema de denudación kárstica | | Autogénico-abierto |
| Grado de karstificación | | Medio (O4) |
| Erosión | Vertical | Media (O4) |
| | Horizontal | Media (O4) |
| Nivel base de disolución | Posición | Inferior |
| | Dinámica | Estable |
| Temperatura | | 25° casi constante |
| Grado de conservación forestal | | Alto (Natural) (O4) |
| Drenaje superficial | Abundancia | Media |
| | Geometría | Valles en v o encajonados, rectilíneos o meándricos, paralelos (O4) |
| | Orientación | En función del fracturamiento y la pendiente regional: NE-SW, NW-SE (O4) |
| | Descarga | En cantiles, ponores, dolinas, poljes y planicies de corrosión |
| | Condiciones de humedad | Mayormente húmedo |
| | Escorrentía | Intermitente, torrencial (O4) |
| | Agua de infiltración | - |
| Control estructural (vías de disolución) | | Alto. Caracterizado por dos series de valles de fracturamiento controlado: NE-SW, NW-SE |
| Pendiente del relieve | | Suaves (0-40°), moderadas (40-60°), y empinadas (60-90°) |
| Litología carbonatada | Tipo de roca | Caliza <i>Mudstone</i> (Dunham, 1962) (M2) |
| | Estratificación | Media 0.5-3m (M2) |
| | Intemperismo | Si (M2) |
| | Color | Gris claro (M2) |
| | Dureza Mohs | 3.5 (M2) |
| | Dureza Schmidt | 16.3 (n=9) (M2) |
| | Porosidad | Alta 13.8% (M2) |
| | Contenido fósil | No evidente |
| | Estructuras menores | Karren (M2) Espeleotemas (M3) |
| Lineamientos | Abundancia | 252 |
| | Densidad | 7.04 Lin/Km ² |
| | Dispersión azimutal | Alta (R-mag=0.15) |

| | | | | |
|--|---------------------------------|--|---|--|
| | Longitud | Se extienden por más de 3.1Km | | |
| | Orientación preferente | Primaria NE-SW Secundaria NW-SE | | |
| | Clases de mayor frecuencia (Az) | 30-40,50-60,80-90,120-130 (4) | | |
| Depresiones Kársticas | Abundancia | 30 | | |
| | Densidad | 0.84 Dk/Km ² | | |
| | Geometría | Grandes y alargadas | | |
| | Distribución | Alineadas | | |
| | Longitud | Rango | 34-2194m x 20-187m | |
| | | Media | 699m x 102m | |
| | Tipo evolutivo | Dolina | 29 | |
| | | Polje | 1 de nivel base relicto | |
| | Orden de escurrimiento | 0 | 2 | |
| | | 1 | 14 | |
| 2 | | 13 | | |
| 3 | | 1 | | |
| Colinas Kársticas Residuales | Abundancia | 111 | | |
| | Densidad | 3.1 Ckr/Km ² | | |
| | Geometría horizontal | Alargadas y redondeadas | | |
| | Distribución | Aisladas, agrupadas o encadenadas paralelamente a los lineamientos | | |
| | Altura | Rango | 10-325m | |
| | | Media | 92m | |
| | Tipo | Cúpula | 5 | |
| | | Cono | 102 | |
| Mogote | | 0 | | |
| Torre | | 4 | | |
| Proceso geomorfológico | Dominante | Erosión lineal en función del fracturamiento regional | | |
| | Subdominantes | Disolución Erosión fluvial en función de la pendiente regional Aplanamiento por corrosión | | |
| Factores de desarrollo kárstico | Primario | Estructura geológica | | |
| | Secundario | Litología | | |
| | Terciario | Pendiente regional | | |
| | Cuaternario | Condiciones climáticas | | |
| Evolución | Hipótesis | Al igual que su similar Coconá, este conjunto laberíntico (pl18) presenta rasgos de fracturamiento que probablemente evidencian el desarrollo de un paleokarst laberíntico laramídico insipiente con orientación NW-SE, tras del cual floreció la karstificación perpendicular a este, a través del fracturamiento reciente (Mioceno-Plioceno). Además, es evidente su evolución periférica a karst residual, zonas que han alcanzado el nivel base de disolución. | | |
| | Evidencias paleokársticas | Largo polje de nivel base relicto con orientación NW-SE, y presencia de planicies de corrosión periféricas. | | |
| Determinación taxonómica del paisaje kárstico | Género | <i>Karst laberíntico</i> (Brook, y otros, 1978) | | |
| | Tipo | <i>Karst laberíntico cónico</i> (Haryono, y otros, 2004) | | |
| | Subtipo | <i>Karst laberíntico cónico con cúpulas y torres subdominantes</i> (Peña Ramírez, 2012) | | |
| Localidades de referencia | Género | Homotipo | <i>Karst laberíntico</i> (Brook, y otros, 1978) Montañas Estrella, Nueva Guinea | |
| | | Holotipo | <i>Karst laberíntico cónico</i> (Haryono, y otros, 2004) Gunung Sewu, Indonesia | |
| | Homotipo | <i>Karst laberíntico cónico</i> (Haryono, y otros, 2004) Valle Fengcong | | |



Figura 196. Vista este del Karst laberíntico cónico Agua Escondida
Torre kárstica (Cerro la Campana) a la izquierda y bloque laberíntico al centro derecha
Fotografía de Campo



Figura 197. Vista este del bloque laberíntico Agua Escondida
Fotografía de Campo

4.1.19 KARST POLIGONAL CÓNICO XICOTÉNCATL

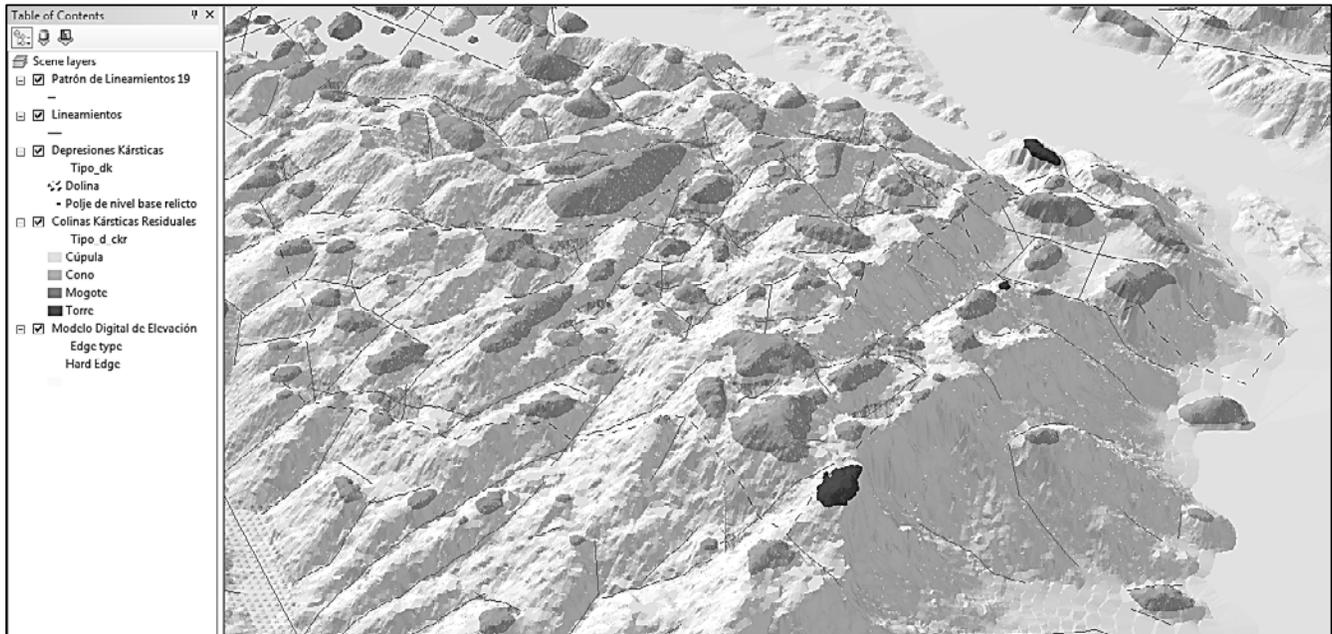


Figura 198. Modelo digital del *Karst poligonal cónico* Xicoténcatl

| | | |
|---|------------------------|--|
| Patrón de lineamientos | | 19 |
| Tipo de patrón de lineamientos | | Entrecruzados |
| Área | | 7.94Km ² |
| Estructura geológica | | Anticlinal cilíndrico con cierre periclinal Miraflores |
| Pendiente regional | | NE-SW |
| Sistema de denudación kárstica | | Autogénico-abierto |
| Grado de karstificación | | Medio |
| Erosión | Vertical | Media |
| | Horizontal | Media |
| Nivel base de disolución | Posición | Inferior |
| | Dinámica | Estable |
| Temperatura | | 25° casi constante |
| Grado de conservación forestal | | Alto (Natural) |
| Drenaje superficial | Abundancia | Baja |
| | Geometría | Malla poligonal de captación centrípeta con valles meándricos o dendríticos fragmentados |
| | Orientación | Desordenado y en función del fracturamiento: NE-SW, NW-SE |
| | Descarga | En cantiles, ponores, dolinas y planicies de corrosión |
| | Condiciones de humedad | Mayormente húmedo |
| | Escorrentía | Intermitente, torrencial |
| | Agua de infiltración | - |
| Control estructural (vías de disolución) | | Alto. Caracterizado por dos series de valles fragmentados de fracturamiento controlado: NE-SW, NW-SE |
| Pendiente del relieve | | Suaves (0-40°), moderadas (40-60°), y en algunos casos empinadas (60-90°) |
| Litología carbonatada | Tipo de roca | Caliza-Lutita (Islas Tenorio, y otros, 2005) |
| | Estratificación | - |
| | Intemperismo | - |
| | Color | - |
| | Dureza Mohs | - |
| | Dureza Schmidt | - |
| | Porosidad | - |
| | Contenido fósil | - |
| | Estructuras menores | - |
| Lineamientos | Abundancia | 80 |
| | Densidad | 10.07 Lin/Km ² |
| | Dispersión azimuthal | Alta (R-mag=0.15) |

| | | | | |
|--|---------------------------------|---|--|--|
| | Longitud | Se extienden por más de 2.1Km | | |
| | Orientación preferente | Primaria NE-SW Secundaria NW-SE | | |
| | Clases de mayor frecuencia (Az) | 20-30,30-40,60-70,70-80,110-120 (5) | | |
| Depresiones Kársticas | Abundancia | 32 | | |
| | Densidad | 4.03 Dk/Km ² | | |
| | Geometría | Medianas y alargadas | | |
| | Distribución | Regular | | |
| | Longitud | Rango | 37-419m x 12-171m | |
| | | Media | 174m x 62m | |
| | Tipo evolutivo | Dolina | 32 | |
| | | Polje | 0 | |
| | Orden de escurrimiento | 0 | 2 | |
| | | 1 | 12 | |
| 2 | | 16 | | |
| 3 | | 2 | | |
| Colinas Kársticas Residuales | Abundancia | 50 | | |
| | Densidad | 6.29 Ckr/Km ² | | |
| | Geometría horizontal | Alargadas y redondeadas | | |
| | Distribución | Regular | | |
| | Altura | Rango | 10-325m | |
| | | Media | 181m | |
| | Tipo | Cúpula | 0 | |
| | | Cono | 49 | |
| Mogote | | 0 | | |
| | Torre | 1 | | |
| Proceso geomorfológico | Dominante | Disolución | | |
| | Subdominantes | Erosión lineal en función del fracturamiento regional Erosión fluvial en función de la pendiente regional Aplanamiento por corrosión | | |
| Factores de desarrollo kárstico | Primario | Litología | | |
| | Secundario | Estructura geológica | | |
| | Terciario | Pendiente regional | | |
| | Cuaternario | Condiciones climáticas | | |
| Evolución | Hipótesis | Es posible que esta área poligonal (pl19) se haya diferenciado del conjunto laberíntico (pl18) aprovechando la geometría cilíndrica del anticlinal Miraflores sobre el que se desarrolla. Esta base de poca pendiente ha posibilitado el desarrollo de numerosas dolinas y colinas kársticas, en algunos casos francamente ortogonales. | | |
| | Evidencias paleokársticas | Posición superior en el conjunto calcáreo Tapijulapa, y susceptibilidad casi equitativa a los dos sistemas de fracturamiento regional (NW-SE y NE-SW) | | |
| Determinación taxonómica del paisaje kárstico | Género | <i>Karst poligonal</i> (Williams, 1972) | | |
| | Tipo | <i>Karst poligonal cónico</i> (Peña Ramírez, 2012) | | |
| | Subtipo | <i>Karst poligonal cónico con torre subdominante</i> (Peña Ramírez, 2012) | | |
| Localidades de referencia | Género | Homotipo | <i>Karst poligonal</i> (Williams, 1972) Papúa Nueva Guinea | |
| | | Holotipo | <i>Karst poligonal cónico</i> (Peña Ramírez, 2012) Sierra de Tabasco, México | |
| | Tipo | Homotipo | <i>Karst poligonal cónico</i> (Williams, 1972) (Peña Ramírez, 2012) Papúa Nueva Guinea | |

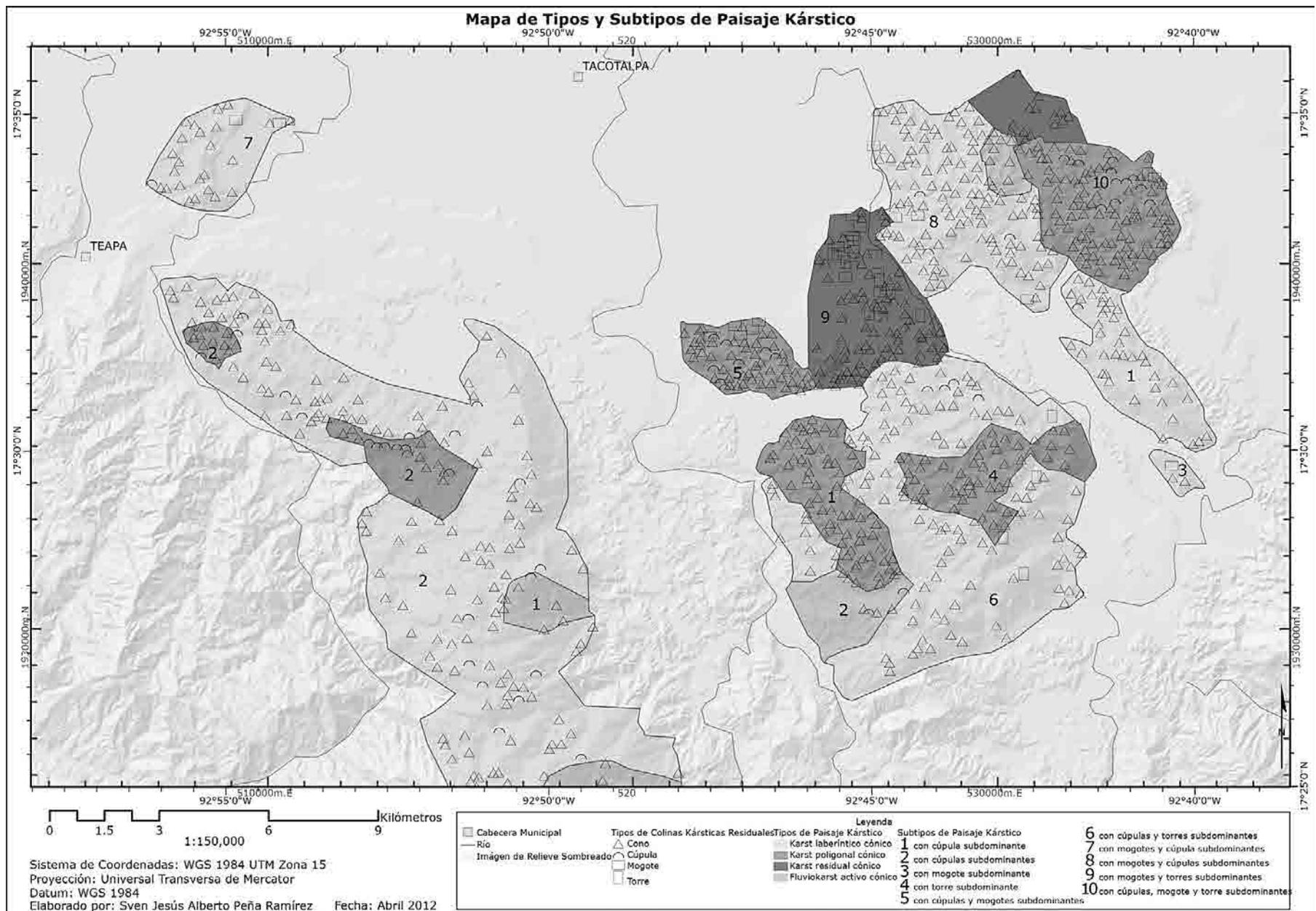


Figura 199. Vista este del *Karst poligonal cónico* Xicoténcatl (derecha)
Fotografía de Campo



Figura 200. Vista norte del *Karst poligonal cónico* Xicoténcatl (al fondo)
Fotografía de Campo

4.2 MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE LOS TIPOS Y SUBTIPOS DE PAISAJE KÁRSTICO EN EL PARQUE ESTATAL DE LA SIERRA DE TABASCO



Mapa 28. Mapa de distribución de los Tipos y Subtipos de Paisaje Kárstico en el Parque Estatal de la Sierra de Tabasco

4.3 COMPOSICIÓN DEL PAISAJE KÁRSTICO EN EL PARQUE ESTATAL DE LA SIERRA DE TABASCO

4.3.1 ECOLOGÍA DEL PAISAJE, GEODIVERSIDAD Y CONSERVACIÓN

Toda vez diferenciado, caracterizado y determinado el paisaje kárstico, se está en posibilidad de evaluar su composición tipológica en el contexto de la ecología del paisaje. Así, retomando el planteamiento y fundamentación teórica de esta investigación, es necesario precisar la teoría y práctica de dicha disciplina.

La *Ecología del Paisaje* se define como el estudio de las interacciones entre los aspectos temporales y espaciales del paisaje, su flora, fauna y componentes culturales (Asociación Internacional de Ecología del Paisaje, (1998) 2006). Esta ciencia interdisciplinaria estudia la interacción entre el patrón espacial y los procesos ecológicos, es decir las causas y las consecuencias de la heterogeneidad espacial a lo largo de una serie de escalas, dando lugar a un conjunto de principios diferentes de aquellos que gobiernan las poblaciones y comunidades a escalas espaciales y temporales normalmente más reducidas (Irastorza Vaca, 2006). La ecología del paisaje, según Forman (1995), estudia el paisaje con tres objetivos:

1. Establecer las pautas de distribución de los elementos que lo componen o lo que es igual, su estructura espacial.
2. El funcionamiento de esa estructura, describiendo las interacciones, los flujos de energía, nutrientes y especies, entre los elementos espaciales que lo componen.
3. El cambio de la estructura y del funcionamiento de la misma, es decir la evolución del paisaje en el tiempo.

Los *principios emergentes de la ecología del paisaje* pueden resumirse en el principio de heterogeneidad de elementos paisajísticos, que los rige. Estos siete principios emergentes son: estructura y función del paisaje, diversidad biótica, movimiento de especies, redistribución de nutrientes, flujo de energía, cambio de paisaje y estabilidad (Irastorza Vaca, 2006).

Tomando en cuenta el paisaje desde el punto de vista integral, es decir, considerando sus componentes bióticos y abióticos, el establecimiento de su estructura espacial y funcionamiento ha de basarse en un principio en la evaluación de las *propiedades emergentes* de ambos componentes, tales como riqueza específica, abundancia, composición, diversidad y distribución, entre otras. De entre dichas propiedades, la diversidad, ya sea geológica, biológica o cultural, es uno de los principales indicadores de la estructura y funcionamiento del ecosistema. Si bien los métodos de evaluación y cuantificación biótica se encuentran actualmente bien establecidos, los de evaluación y cuantificación geológica son aislados, poco numerosos y carentes de consenso entre la comunidad científica global (Calvo, 2010).

Es así como a finales de los 90, tras la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro (1992), surge el concepto de geodiversidad como elemento teórico complementario de la ecología del paisaje, cuando se hace patente la existencia de una parte inerte, pero estrechamente relacionada con el ecosistema y las especies bióticas, sin la cual no es posible gestionar, proteger ni conservar la naturaleza (**Figuras 201 y 202**) (Calvo, 2010). Con la difusión de programas internacionales de conservación como el de Áreas Naturales Protegidas y Patrimonio Natural Mundial, entre otros, la importancia intrínseca de la geodiversidad se ha ido incrementando progresivamente. El ordenamiento ecológico y territorial así como las medidas de conservación y desarrollo sustentable, cada vez demandan mayor conocimiento de los cambios que con el tiempo puede sufrir un paisaje y los patrones territoriales que lo definen, también es cada vez más necesario y útil poder comparar dos o más paisajes con otro dado para poder extrapolar entre ellos los estudios que se lleven a cabo en los mismos. Tal como afirma Irastorza (2006), estas son razones

de peso que hacen necesario el desarrollo y aplicación de métodos que describan y cuantifiquen los patrones o estructuras espaciales del paisaje y su geodiversidad.

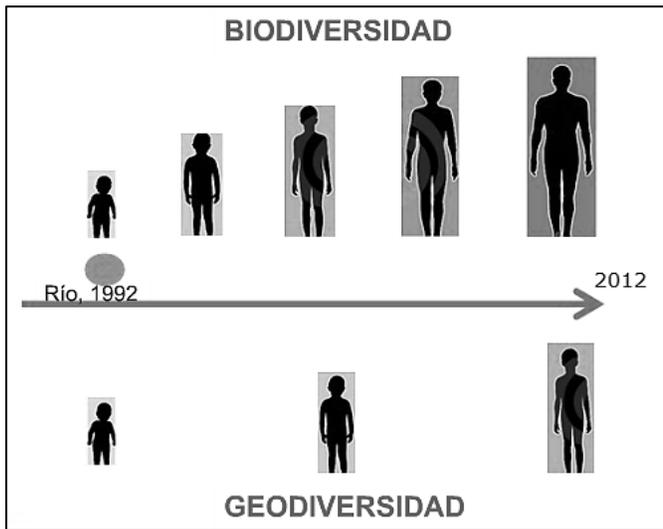


Figura 202. Desarrollo de los conceptos de biodiversidad y geodiversidad
 Reproducido y modificado de (Calvo, 2010)

La *Geodiversidad* se define como la diversidad de las características inertes de la superficie terrestre, producto de la evolución del Sistema Tierra (procesos internos y externos) y soporte dinámico e interrelacionado con la vida (Calvo, 2010). La escala temporal de estudio puede abarcar desde el tiempo sincrónico hasta el geológico. La escala espacial desde aspectos microscópicos hasta hemisféricos. Los *Valores de la Geodiversidad* pueden resumirse en seis principales (tipos): intrínseco, cultural, estético, económico, científico y educativo, y funcional (Calvo, 2010) (Tabla 49).

También, al igual que la biodiversidad, la geodiversidad sufre de amenazas recurrentes tales como la pérdida física de un geoelemento, fragmentación del objeto de interés geológico, interrupción de la dinámica natural, contaminación e impacto visual (Calvo, 2010).

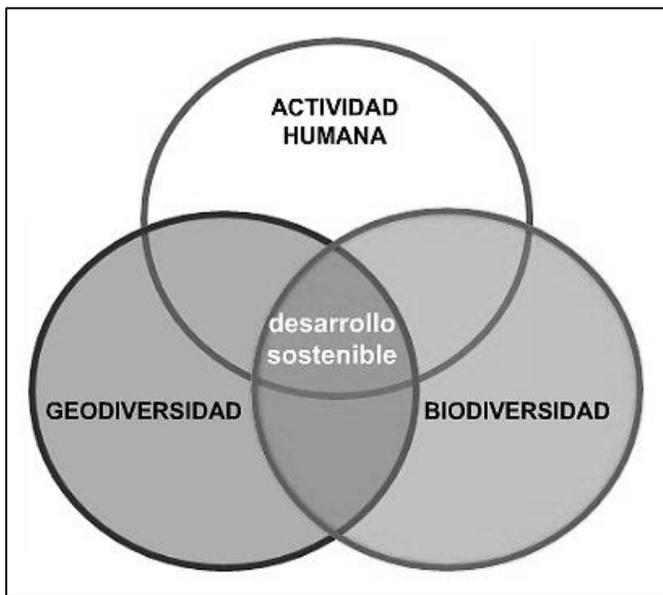


Figura 201. Enfoque integral de desarrollo sostenible con base en la diversidad geológica, biológica y cultural
 Reproducido de (Calvo, 2010)

La conservación de la geodiversidad tiene que ver con el *Patrimonio Geológico*, lugares o puntos de interés geológico cuyo valor les hace destacar del entorno circundante. El objetivo final del patrimonio geológico es promover su conservación, para mantener la geodiversidad, así como facilitar su utilización y disfrute (Calvo, 2010). Para ello es necesaria la identificación, caracterización e inventario, legislación, divulgación y geoconservación (Tabla 50).

En el marco de la Convención del Patrimonio Mundial (World Natural Heritage) de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), el karst se integra a la lista como *Patrimonio Mundial de Paisajes y Cuevas Kársticas* (International Union for Conservation of Nature. World Heritage Convention, 2008),

donde se consideran candidatos potenciales a obtener dicho reconocimiento los sitios con las siguientes características:

- Paisajes que son formados por la acción principal de procesos kársticos por encima y por debajo del suelo; y
- Paisajes kársticos y cuevas con importancia excepcional y universal en relación con las Ciencias de la Tierra, asumiendo su accesibilidad y comprensión por parte de la sociedad civil.

Tabla 49. Valores de la geodiversidad
 Reproducido y modificado de (Calvo, 2010)

| Geodiversidad | | |
|------------------------|--|--|
| Valores | Características | Ejemplos |
| Intrínseco | Valor por si misma y no por el uso que el hombre le pueda dar (utilitarismo) | - Ecocentrismo |
| Cultural | Valor que una sociedad le da a un lugar en razón de su significado social y comunitario | - Folklore (geomitología): Cuevas y Montañas Sagradas - Valor arqueológico/histórico - Sentido de lugar: sociedades indígenas agrícolas y "madre tierra" |
| Estético | Atractivo visual como escenario de un paisaje | - Paisajes locales: lagos, volcanes, cañones - Geoturismo: Parques geológicos, Parques Nacionales, Monumentos Naturales - Inspiración artística: pintura, música, cine |
| Económico | Bienes y actividades que integran su riqueza económica | - Combustibles: carbón, petróleo, uranio - Gemas: diamantes, esmeraldas, zafiros - Minerales metalíferos: calcopirita, casiterita, oro - Materiales ornamentales: mármol, granito - Materiales de construcción: áridos, cementos, arcillas - Materiales industriales: feldespato, mica, cuarzo - Recursos renovables: viento, ríos, olas, mareas |
| Científico y Educativo | Comprensión de los procesos que suceden a nuestro alrededor e implicaciones en investigación pura y aplicada | - Historia de la Tierra - Historia de la investigación - Registro ambiental - Educación y formación de profesionales |
| Funcional | Geosistemas | - Soporte de ecosistemas: ríos, lagos, playas, desiertos, selvas - Soporte-plataforma: aeropuertos, edificios, parques industriales, carreteras - Almacenaje: acuíferos, sedimentos - Reciclaje natural y control de la contaminación - Salud: oligoelementos en agua (cinc y aluminio) |

La consideración tentativa de relieves kársticos para su integración al programa demanda cuatro propiedades:

1. Duplicación nula. Que el área kárstica posea una relación geodiversidad-biodiversidad aún no considerada dentro de la lista actual de patrimonio mundial.
2. Reconocimiento. Que el valor del patrimonio kárstico se encuentre formalmente escrito y reconocido por la comunidad científica e institucional.
3. Potencial para llenar los vacíos en la lista actual. Han de considerarse prioritarios aquellos karsts con una excepcional biodiversidad y amplios valores de geodiversidad.
4. Estatus Geoparque. El reconocimiento regional o nacional del karst puede proveer una vía más apropiada de conservación en los sitios restantes.

Tabla 50. Requerimientos para la conservación del patrimonio geológico
 Reproducido y modificado de (Calvo, 2010)

| Conservación del patrimonio geológico | | |
|--|--|--|
| Requerimientos | Características | Ejemplos |
| Identificación, caracterización e inventario | Implica la identificación, localización y clasificación de los lugares de interés geológico. | - Características geológicas de una región - Diversidad y valor (cultural, estético, científico, etc.) |
| Legislación | Establecimiento de leyes específicas para la geoconservación | |
| Divulgación | Articulación de actores y acciones gubernamentales, institucionales y comunitarias en pro de la geoconservación y su aprovechamiento sustentable | - Gobiernos estatales y municipales - Instituciones educativas - Sector turismo |
| Geoconservación | Programas y figuras de geoconservación con reconocimiento nacional e internacional | Programas internacionales - Patrimonio Natural Mundial - Programa Hombre y Biósfera - Programa <i>Geoparks</i> Figuras de geoconservación - Reserva Natural Estricta - Parque Nacional - Monumento o Característica Natural - Paisaje Protegido - Geoparque |

A su vez, se recomienda que los karsts a integrarse en la lista de patrimonio mundial satisfagan uno o más de los siguientes criterios (International Union for Conservation of Nature. World Heritage Convention, 2008):

1. (vii) Que contengan fenómenos naturales superlativos o áreas de excepcional belleza natural e importancia estética.
2. (viii) Ser ejemplos eminentemente representativos de las grandes etapas de la historia de la Tierra, incluyendo el registro de la vida, importante en los procesos geológicos en curso en el desarrollo de las formas terrestres, o poseer importantes características geomorfológicas o fisiográficas.
3. (ix) Ser ejemplos eminentemente representativos en el curso de los procesos ecológicos y biológicos en la evolución y desarrollo de los ecosistemas terrestres, dulceacuícolas, costeros y marinos, y las comunidades de plantas y animales.
4. (x) Que contengan los hábitats naturales más importantes y significativos para la conservación *in-situ* de la diversidad biológica, incluyendo aquellos que contienen especies amenazadas de destacado valor universal desde el punto de vista de la ciencia de la conservación.

En relación a esto, la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN), a través de la Comisión Mundial de Áreas Protegidas (WCPA) sugiere pautas generales a considerar en la conservación del karst (International Union for Conservation of Nature. World Commission on Protected Areas, 1997). Entre éstas se menciona que:

...(1) La planificación efectiva para regiones kársticas exige una apreciación integral de todos sus valores económicos, científicos y humanos dentro del contexto cultural y político local.

...(10) Áreas o sitios con un alto valor natural, social o cultural; que posean una amplia gama de valores en un solo sitio; que han sufrido una mínima degradación ambiental; como también de

un tipo aún no representado en el sistema de áreas protegidas del país deberían tener la prioridad en la protección.

...(30) Se deben preparar bancos de datos que registren las áreas kársticas y las cuevas incluidas dentro de áreas protegidas, además de identificar áreas significativas que merecen protección. Igualmente deben registrarse los valores kársticos de las áreas designadas como "Herencia Mundial", tanto actuales como en potencia.

Ahora bien, aunque el relieve kárstico se considera parte integral de una gran variedad de áreas naturales protegidas (e.g. las Reservas de la Biósfera de Sian Ka-an y Selva El Ocote), en muchos casos su conservación es considerada indirecta y ampliamente por la biodiversidad y diversidad cultural que sostiene, y escasamente por el papel que juega dentro del ecosistema regional. La investigación especializada, caracterización geomorfológica e hidrogeológica, valoración específica de la geodiversidad y del patrimonio natural que representa, aumenta las posibilidades de ahondar en el conocimiento de los ecosistemas kársticos, de su reconocimiento específico dentro de las figuras de conservación existentes, y por ende de su aprovechamiento sustentable. El conocimiento de la geodiversidad presente en las áreas kársticas ha contribuido en muchas ocasiones en la optimización misma de los programas de conservación biótica, y en el desarrollo sustentable de numerosas comunidades alrededor del mundo (Research Institute of Geology and Mineral Resources, 2004). En la **Tabla 51** se enlistan las principales figuras de geoconservación con reconocimiento nacional e internacional.

La geodiversidad, como uno de los principales indicadores de la estructura y funcionamiento del ecosistema, es parte fundamental en la gestión de espacios protegidos, por lo que necesita ser evaluada a través de métodos objetivos y/o cuantitativos (Calvo, 2010). Los trabajos sobre su evaluación son aún escasos y varían en cuanto a la metodología aplicada, escala espacial y temporal de estudio (**Tabla 52**).

Tabla 51. Figuras de geoconservación con reconocimiento nacional e internacional
 Elaborada con base en (International Union for Conservation of Nature, 2008) e (Instituto Nacional de Ecología, 2004)

| Figura de geoconservación | Características |
|--|---|
| <i>Reserva Natural Estricta</i> Categoría Ia (IUCN, 2008) | Son áreas protegidas, estrictamente dispuestas para la protección de la biodiversidad y también, posiblemente, de características geológicas o geomorfológicas, donde la visitación, uso e impactos son estrictamente controlados y limitados para garantizar la protección de los valores de conservación. Estas áreas protegidas pueden servir como áreas de referencia indispensables para la investigación científica y monitoreo. |
| <i>Área Silvestre</i> Categoría Ib (IUCN, 2008) | Áreas protegidas usualmente extensas, no modificadas o ligeramente modificadas, que conservan su carácter e influencia natural, sin presencia humana permanente o significativa, la cual es protegida y manejada para preservar su condición natural. |
| <i>Parque Nacional</i> Categoría II (IUCN, 2008) | Áreas casi o completamente naturales, establecidas para proteger los procesos ecológicos de gran escala, junto con las especies y ecosistemas característicos del área, los cuales también proporcionan una base para las oportunidades espirituales, científicas, educativas, recreativas y turísticas, ambiental y culturalmente compatibles. |
| <i>Monumento o Característica Natural</i> Categoría III (IUCN, 2008) | Áreas establecidas para proteger un monumento natural específico, el cual puede ser una geoforma, montaje marino, caverna submarina, característica geológica como una cueva o incluso una característica viva como un bosque antiguo. Por lo general son áreas protegidas muy pequeñas y a menudo con alta asistencia de visitantes. |
| <i>Paisaje Protegido</i> Categoría V (IUCN, 2008) | Área protegida donde la interacción de personas y naturaleza ha producido a través del tiempo un área de carácter definido con un importante valor ecológico, biológico, cultural y escénico, y donde la salvaguardia de la integridad de esta interacción es vital para la protección y mantenimiento del área, y su naturaleza y demás valores asociados. |
| <i>Área Protegida con Uso Sustentable de los Recursos Naturales</i> Categoría VI (IUCN, 2008) | Áreas protegidas de conservación de ecosistemas y hábitats, junto con los valores culturales asociados y sistemas tradicionales de manejo de recursos naturales. Son generalmente grandes, con la mayoría del área en estado natural, donde una parte se encuentra bajo la gestión sustentable de los recursos naturales, y donde el uso no industrial y de bajo nivel de los recursos naturales, compatible con la conservación de la naturaleza, es visto como uno de los principales objetivos del área. |
| <i>Geoparque</i> (UNESCO) | Territorio con un patrimonio geológico notable, que lleva a cabo un proyecto de desarrollo que implica labores de geoconservación, divulgación y desarrollo socioeconómico de la región. Un Geoparque tendrá un plan de manejo diseñado para impulsar el desarrollo socio-económico preferentemente basado en actividades productivas cuidadosas del medio ambiente, como el geoturismo y otras empresas locales innovadoras así como también, pequeños negocios y sus productos derivados (geo-productos); estas empresas generarán ingresos para la población local atrayendo capitales privados |
| <i>Reserva de la Biósfera</i> (CONANP) | Áreas representativas de uno o más ecosistemas no alterados por la acción del ser humano o que requieran ser preservados y restaurados, en las cuales habitan especies representativas de la biodiversidad nacional, incluyendo a las consideradas endémicas, amenazadas o en peligro de extinción. |

| | |
|---|--|
| <i>Parque Nacional</i> (CONANP) | Áreas con uno o más ecosistemas que se signifiquen por su belleza escénica, su valor científico, educativo de recreo, su valor histórico, por la existencia de flora y fauna, por su aptitud para el desarrollo del turismo, o por otras razones análogas de interés general. |
| <i>Monumento Natural</i> (CONANP) | Áreas que contienen uno o varios elementos naturales, que su por carácter único, valor estético, histórico o científico, se resuelva incorporar a un régimen de protección absoluta. No tienen la variedad de ecosistemas ni la superficie necesaria para ser incluidos en otras categorías de manejo. |
| <i>Área de Protección de Recursos Naturales</i> (CONANP) | Son áreas destinadas a la preservación y protección del suelo, las cuencas hidrográficas, las aguas y en general los recursos naturales localizados en terrenos forestales de aptitud preferentemente forestal. |
| <i>Santuario</i> (CONANP) | Áreas establecidas en zonas caracterizadas por una considerable riqueza de flora o fauna o por la presencia de especies, subespecies o hábitat de distribución restringida. Abarcan cañadas, vegas, relictos, grutas, cavernas, cenotes, caletas u otras unidades topográficas o geográficas que requieran ser preservadas o protegidas. |

Tabla 52. Trabajos de evaluación de geodiversidad

Elaborada con base en (Irastorza Vaca, 2006), (Serrano Cañadas, y otros, 2007) y (Calvo, 2010)

| Trabajo | Unidades de estudio | Método | Resultados |
|---|--|---|--|
| Irastorza. 2006. <i>Integración de la Ecología del Paisaje en la Planificación Territorial. Aplicación a la Comunidad de Madrid</i> | Generadas con base en <i>uso de suelo</i> | Métrica de la Ecología del Paisaje <i>Riqueza, Abundancia, Densidad, Tamaño, Índice de diversidad y equitatividad de Shannon, Dimensión fractal obtenida por regresión.</i> | <i>Mapas de grados de protección y diversidad.</i> |
| Serrano & Ruiz. 2007. <i>Geodiversidad: Concepto, Evaluación y Aplicación Territorial. El Caso de Tierras Caracena (Soria)</i> | Generadas a partir de un <i>análisis multifactorial</i> (tectónica y estructura, elementos litoestratigráficos, geomorfología y edafología). | <i>Índice de geodiversidad</i> basada en el número de unidades de geodiversidad, coeficiente de rugosidad del terreno y superficie real. | <i>Valoración y Mapa de geodiversidad</i> |
| Calvo. 2010. <i>Geodiversidad de la Península Ibérica</i> | Generadas a partir de la clasificación del terreno por <i>factores de geodiversidad</i> : unidades geológicas (material, edad y estructura), morfoclima, y morfometría (pendiente, curvatura y rugosidad). | Métrica de la Ecología del Paisaje. <i>Índice de diversidad y equitatividad de Shannon.</i> | <i>Mapa y gráficos de geodiversidad.</i> |
| Pellitero, y otros, 2010. <i>Geodiversidad de Cañón del Ebro y el Río Rudrón</i> | Generadas a partir de un <i>análisis multifactorial</i> (litología, estructura geológica, geomorfología, morfogenética, hidrografía y edafología). | <i>Índice de geodiversidad</i> basada en el número de unidades de geodiversidad, coeficiente de rugosidad del terreno y superficie real. | <i>Mapa de geodiversidad y geomorfositos, y gráficos de valores de la geodiversidad.</i> |
| Calvo. 2010. <i>Evaluando la geodiversidad a través del tiempo</i> | Generadas a partir de la <i>reconstrucción de paleopaisajes</i> , y <i>análisis multifactorial</i> (geología y morfometría) | Métrica de la Ecología del Paisaje. Densidad de <i>Riqueza e Índice de diversidad y equitatividad de Shannon.</i> | <i>Mapas, modelos y gráficos de geodiversidad temporal.</i> |

4.3.2 ESTABLECIMIENTO, FUNDAMENTACIÓN Y SELECCIÓN DE UNIDADES, ESCALAS Y MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA GEODIVERSIDAD Y VALORES ASOCIADOS

Como se ha expuesto, la teoría de la geoconservación es relativamente reciente, los conceptos de geodiversidad y patrimonio geológico cada vez tienen mayor presencia dentro de los programas y figuras de conservación de la naturaleza, a nivel nacional e internacional. También se ha hecho notable que gran parte de la teoría de la geoconservación se ha desarrollado a partir de disciplinas tales como la Biología, Ecología del Paisaje, Geografía Ambiental, Ecología y Estadística, entre otras.

Por lo que prosigue en esta investigación, es necesario exponer las razones teóricas consideradas para la selección de las unidades, escala y métodos de estudio para la evaluación de la geodiversidad y valores asociados en el Parque Estatal de la Sierra de Tabasco.

4.3.2.1 ESTUDIOS PRECEDENTES

Las unidades para la evaluación de la geodiversidad (UEG) se han venido construyendo a partir de la resultante analizada de dos o más factores geológicos, tales como: tectónica, estructura, morfogenética, litología, edad, geomorfología, caracteres morfométricos, morfoclima, edafología e hidrografía (Serrano Cañadas, y otros, 2007) (Calvo, 2010). Por el tipo de análisis espacial que estos estudios hacen de los diferentes factores geológicos, podrían considerarse semejantes a la regionalización geomorfológica, geocología del paisaje e incluso al ordenamiento ecológico territorial.

Respecto a la escala, y excluyendo los trabajos con variación en la escala temporal, la mayoría de las investigaciones en geoconservación aplicada han evaluado la geodiversidad a escala pequeña y media, esto es, desde países enteros como España y hasta áreas de dimensiones regionales. Esta escala de trabajo permite tener una visión general del patrimonio geológico y su geodiversidad, i.e. de los diferentes modelados presentes en cierta área y su abundancia relativa (**Figura 203**).

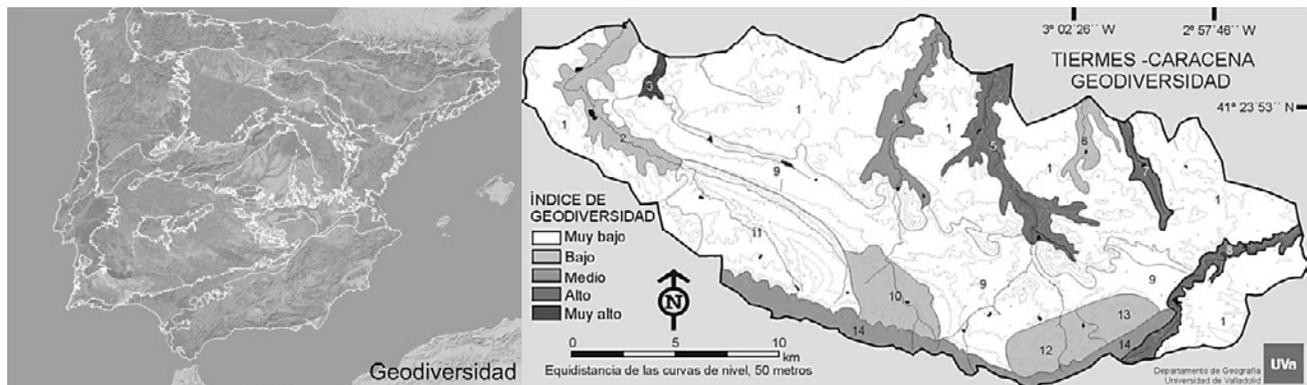


Figura 203. Mapas de geodiversidad de España y Tiernes-Caracena
 Reproducido de (Calvo, 2010) y (Serrano Cañadas, y otros, 2007)

En cuanto a la metodología, y tal como afirman Carcavilla, y otros, (2008), el estudio de la geodiversidad debe basarse en la metodología utilizada para analizar la diversidad de cualquier variable, es decir, atendiendo a las dos propiedades estadísticas de cualquier mezcla de objetos: 1) el número de diferentes tipos de objetos (denominados clases) que se encuentran mezclados en la muestra; y 2) el número o la abundancia relativa de cada una de esas clases. La serie de objetos concretos (clases de elementos geológicos) que componen la geodiversidad hacen válida la aplicación de dicha metodología. Sin embargo, al análisis de geodiversidad se deben sumar la estructura espacial y temporal de los objetos (distribución tridimensional, cronológica y patrones) y las relaciones entre ellos (Carcavilla, y otros, 2008), la evaluación de estos dos aspectos se

tratará en el análisis y discusión de resultados. Se ha demostrado que la Ecología del Paisaje y la Geografía Ambiental, a través de las propiedades emergentes y el análisis espacial, aportan metodologías de gran utilidad para la evaluación de la geodiversidad (Irastorza Vaca, 2006) (Serrano Cañadas, y otros, 2007) (Calvo, 2010).

4.3.2.2 FUNDAMENTACIÓN Y ESTABLECIMIENTO TEÓRICO DE LA GEODIVERSIDAD Y SUS UNIDADES Y ESCALAS DE EVALUACIÓN

Como mencionan Carcavilla, y otros (2008), uno de los grandes retos que deben superar los métodos de estudio de la geodiversidad es dar solución a aquellos lugares que exponen una cierta homogeneidad litológica, cronoestratigráfica, estructural y geomorfológica a escala media y grande, y sin embargo muestran una diversidad notable de rasgos geológicos en detalle, como puede ser un macizo kárstico. En ese sentido se han hecho diferentes propuestas, tales como la de Serrano y Ruiz (2007), donde se sugiere el análisis de geodiversidad de partículas, elementos, lugares y paisajes, como cuatro escalas de trabajo; o la de Calvo (2010), la cual propone el análisis de geodiversidad a diferentes escalas, desde cristales minerales, bloques rocosos y hasta grandes cordilleras. Si bien estas jerarquías escalares podrían alcanzar de alguna manera la estandarización de los estudios de geodiversidad de escala media y grande, no dejan de ser clasificaciones artificiales del medio natural. En otras palabras, son categorizaciones basadas en escalas de apreciación aislada, como la de partículas (minerales, sedimentos, energía) y elementos (elementos geológicos, formas, hidrográficos y edáficos); escalas de apreciación no natural, como la de lugares (de interés geomorfológico y geológico); o escalas de apreciación integral del paisaje geográfico (paisajes conformados por la biodiversidad, geodiversidad y diversidad cultural) (Serrano Cañadas, y otros, 2007). Al parecer, es muy probable que la evaluación de la geodiversidad a escala media y grande, demande mucho más que el análisis espacial de los factores geológicos implicados.

La geodiversidad de cada uno de los factores geológicos, es decir, su valoración aislada, es práctica y benéfica para el aprovechamiento de los recursos naturales. Por ejemplo, la geodiversidad litológica en la industria minera y construcción, la geodiversidad de las condiciones meteorológicas en el establecimiento de plantas anemoeléctricas, o la geodiversidad edáfica en la agricultura y ganadería. A pesar de ello, este método de evaluación resulta tan artificial, como el análisis espacial de los factores geológicos implicados en el modelado terrestre. Es posible que ambos métodos de evaluación generen apreciaciones no naturales de la geodiversidad geológica, desmereciendo su papel dentro del ecosistema, su valor intrínseco, e incluso acarreado programas de conservación parciales o fragmentados.

La litología, estructura geológica, tectónica, hidrología, condiciones climáticas y meteorologías, y edafología son factores que actúan en conjunto dentro del sistema Tierra, combinándose y agrupándose para formar una inmensa variedad de *paisajes*. Partiendo del hecho de que el *relieve terrestre* es resultado de su estructura, origen, historia de desarrollo y dinámica actual, i.e. su geomorfología; es comprensible que éste represente la suma de factores geológicos implicados en su caracterización. Como tal, es la figura natural más representativa e integral de la interacción y dinámica geológica, tanto de procesos geológicos internos como externos.

Entendiendo que un *proceso geomorfológico* es un conjunto específico de factores geológicos actuando en la zona de transición interna y externa del sistema Tierra, cuya variabilidad en tipo, cantidad y magnitud lo definen y diferencian. Desde el punto de vista natural, sistémico y representativo, el relieve terrestre encuentra su escala óptima de clasificación en el alcance espacio-temporal que la dominancia de un proceso geomorfológico específico ejerce.

Tomando como modelo los principios taxonómicos de la escuela karstológica tradicional, el *paisaje geomorfológico* se define como la expresión superficial de un conjunto dado de procesos y

unidades geomorfológicas, definido por la variabilidad en tipo, cantidad y magnitud de dichos procesos y unidades, i.e. por su dominancia, codominancia y subdominancia.

Así como la *comunidad*, desde el punto de vista de las especies biológicas, depende de la homogeneidad relativa de los factores abióticos, i.e. de la *estructura proceso-geomorfológica*, para considerarse como tal, y establecer un *ecosistema* espacialmente definido; la *comunidad*, desde el punto de vista de los *paisajes geomorfológicos*, depende de la homogeneidad relativa de la *estructura geológica de gran escala* (e.g. una altiplanicie, cadena montañosa, meseta, llanura costera, macizo kárstico, etc.) para considerarse como tal, y establecer una *región geomorfológica* (Carvajal, y otros, 2004) espacialmente definida. Desde un enfoque integral y sistémico, la comunidad de paisajes geomorfológicos es continua y puede ser mono o pluri ordinal, en otras palabras, puede estar integrada por paisajes del mismo orden (e.g. eólicos) o de diferentes órdenes (e.g. fluviales, costeros y eólicos). Desde un enfoque parcial y funcional, dicha comunidad puede ser continua o discontinua, pero siempre mono ordinal.

Es precisamente en estos aspectos donde se considera que radica la *geodiversidad*, en la variabilidad en tipo, cantidad y magnitud de procesos geomorfológicos, tipos de paisajes geomorfológicos y regiones geomorfológicas. Por tanto, la *diversidad geológica* ha de centrarse en la *diversidad geomorfológica*. La **Tabla 53** muestra una comparación de los tipos de diversidad biológica y geológica con base en el nivel de organización.

Tabla 53. Tipos de diversidad biológica y geológica con base en el nivel de organización

| Escalas de Diversidad | |
|-----------------------|----------------------------|
| Biológica | Geológica (Geomorfológica) |
| Genes | Procesos |
| Especies | Paisajes |
| Ecosistemas | Regiones |

(Peña Ramírez, 2012)

La teoría de la naturaleza dual de los organismos, su dicotomía entre genotipo y fenotipo, es en gran medida, y con ciertas precauciones, adaptable a la *naturaleza dual* de los *paisajes geomorfológicos* (**Tabla 54**). Esto, considerando que el *genotipo* es el conjunto de genes (procesos geomorfológicos) de un organismo (paisaje geomorfológico) que lo asigna a una especie (tipo de paisaje geomorfológico) determinada, y en gran medida influye sobre los aspectos distintivos que lo hacen único como individuo (paisaje geomorfológico) en el seno de la especie a la que pertenece; y el *fenotipo* es la manifestación visible del genotipo en un determinado ambiente (Santa, y otros, 2012). Con ello se hace notable la necesidad de desarrollar una teoría evolutiva geomorfológica, que explique adecuadamente la relación entre el genotipo y fenotipo de los paisajes.

Tabla 54. Naturaleza dual de los organismos biológicos y paisajes geomorfológicos

| Entidad natural | Organismo Biológico | Paisaje Geomorfológico |
|-----------------|---|---|
| Genotipo | Estructura genómica | Estructura proceso-geomorfológica |
| Fenotipo | Morfología, desarrollo, propiedades bioquímicas, fisiología y etología; e.g. en humanos: el color y forma de ojos y cabello, estatura y corpulencia | Morfología, propiedades químicas, funcionamiento y comportamiento inducido; e.g. en Karsts poligonales cónicos: tamaño y forma de las colinas kársticas residuales y depresiones kársticas. |

(Peña Ramírez, 2012)

Dicho enfoque posibilita la comprensión tanto parcial como integral del papel que tiene la diversidad biótica y geológica dentro del ecosistema. También hace que ambas concepciones, geodiversidad y biodiversidad, sean compatibles, permitiendo su estudio y análisis conjunto, desde aspectos relacionados con la ecología de poblaciones hasta cuestiones evolutivas

(respondiendo al análisis evolutivo de paisajes de Calvo, 2010). A su vez, la comprensión del papel que tienen la geodiversidad y sus valores dentro del sistema natural, garantiza el uso sustentable de los recursos naturales asociados.

Los programas y figuras de conservación de la naturaleza, demandan de manera explícita el reconocimiento de los límites espaciales del área a conservar, y en algunos casos los de las áreas núcleo y de amortiguamiento. Dichos límites por lo general se encuentran estrechamente relacionados con la naturaleza de la entidad o entidades a conservar. Esta demanda obedece a la necesidad de tener un área concreta de conservación para garantizar su manejo adecuado e integral. Los paisajes geomorfológicos exponen límites definibles con base en el análisis especializado de su estructura proceso-geomorfológica y configuración espacio-temporal.

Por tanto, en esta investigación se plantea que las *unidades* más adecuadas para la evaluación de la geodiversidad a escala media y grande, son los *paisajes geomorfológicos*. Esto obedece a tres razones:

1. Valoración natural de la riqueza geológica, representada como estructura proceso-geomorfológica, definida espacio-temporalmente como paisaje geomorfológico.
2. Compatibilidad conceptual de la geodiversidad y biodiversidad, desde un enfoque sistémico de la evolución geológica y biológica.
3. Unidades de evaluación de la geodiversidad espacialmente definidas, con base en su diferenciación geomorfológica dentro del sistema natural.

Considerando ahora, que los paisajes geomorfológicos son uno de los tres mayores exponentes de la riqueza geológica (junto con los procesos y regiones geomorfológicas), se establece que la evaluación de su geodiversidad en cierta región geomorfológica (*representativa*) depende de dos factores:

1. Naturaleza de la comunidad analizada: *sistémica o funcional*.
2. Categoría taxonómica de los paisajes geomorfológicos analizados: *orden, género, tipo, subtipo*, siendo la principal el *tipo*.

Complementariamente, y con base en la naturaleza dual de los paisajes geomorfológicos, su *geodiversidad esencial* depende también de dos factores:

1. Genotipo (Estructura proceso-geomorfológica), equivalente a la diversidad de procesos geomorfológicos.
2. Fenotipo (morfología, propiedades químicas, funcionamiento y comportamiento inducido)

En cuanto a la *escala*, los límites del paisaje geomorfológico dependen del alcance espacio-temporal que la dominancia de un proceso geomorfológico específico ejerce, y de la categoría taxonómica analizada. Las zonas de transición entre los paisajes geomorfológicos, han de ser definidas de acuerdo al mismo principio de dominancia de procesos. La consideración de paisajes geomorfológicos (como UEG), respaldados por un sistema estandarizado de clasificación, especializado en cada uno de los diferentes modelados terrestres, ha de garantizar la valoración óptima del patrimonio geológico y su geodiversidad, así como la fundamentación teórica adecuada para su aprovechamiento sustentable. Este enfoque resuelve el reto de valoración de la geodiversidad a escala media y grande, planteado por Carcavilla, y otros (2008).

4.3.2.3 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y SELECCIÓN DE MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA GEODIVERSIDAD

Varios métodos de la Ecología del Paisaje han sido probados con éxito en la evaluación de la geodiversidad (Irastorza Vaca, 2006) (Calvo, 2010), sin embargo, la Ecología contempla mucho más que índices de diversidad, aplicaciones que si bien han sido desarrolladas para la evaluación

de las comunidades biológicas, pueden muy bien adaptarse a la teoría de la geoconservación. Dichas adaptaciones metodológicas deben ser realizadas bajo el entendimiento de la teoría ecológica, supuestos biológicos, y propósitos para los cuales fueron originalmente diseñadas.

Tras la revisión de los métodos ecológicos para la caracterización de las comunidades bióticas, y por considerarlos de gran utilidad en la evaluación de la diversidad geológica, se resolvió la adaptación y aplicación de las tres principales medidas de diversidad (Alfa, Beta, Gamma), y seis procedimientos para la determinación de áreas prioritarias (Moreno, 2001) (Magurran, 2004). Las propiedades emergentes correspondientes suman un total de 15:

- a) Medidas de diversidad con base en su escala espacial
 - i. Diversidad Alfa
 - (S) Riqueza específica
 - (A) Abundancia
 - (Ar) Abundancia relativa
 - (C) Composición
 - (H') Índice de Diversidad de Shannon-Wiener
 - (E) Índice de Equitatividad de Shannon-Wiener
 - (D) Índice de Simpson (Dominancia)
 - ii. Diversidad Beta
 - (J) Coeficiente de Similitud de Jaccard
 - iii. Diversidad Gamma
 - (G) Diversidad Gamma de Schluter y Ricklefs

- b) Cálculos para la identificación de áreas prioritarias de conservación
 - (Amire) Área mínima de representatividad específica
 - (Amadae) Área de mayor diversidad alfa específica
 - (Amadbe) Área de mayor diversidad beta específica
 - (Amirre) Área mínima representativa de riqueza específica
 - (Amare) Área de mayor riqueza específica
 - (Vi) Valor de importancia de la especie i

4.3.2.3.1 MEDIDAS DE DIVERSIDAD CON BASE EN SU ESCALA ESPACIAL

Estas propiedades emergentes introducidas por Whittaker (1960), como su nombre lo indica, permiten evaluar la diversidad a tres diferentes escalas:

- *Diversidad Alfa*. Es la que se presenta dentro de una comunidad [región] (Moreno, 2001). Los métodos para su evaluación se dividen en dos grupos: 1) Métodos basados en la cuantificación del número de especies presentes (riqueza específica); 2) Métodos basados en la estructura de la comunidad, es decir, la distribución proporcional del valor de importancia de cada especie [tipo de paisaje]. Éstos últimos a su vez se clasifican según se basen en la dominancia o en la equidad de la comunidad (Moreno, 2001).
- *Diversidad Beta*. O diversidad entre hábitats [regiones], es el grado de remplazamiento de especies o cambio biótico [remplazamiento de tipos de paisajes geomorfológicos o cambio geomorfológico] a través de gradientes ambientales (Whittaker, (1972) 2001). La medición de la diversidad beta está basada en proporciones o diferencias (Magurran, 2004). Estas proporciones pueden evaluarse con base en índices o coeficientes de similitud, de disimilitud o de distancia entre las muestras a partir de datos cualitativos (presencia-ausencia de especies) o cuantitativos (abundancia proporcional de cada especie medida como número de individuos), o bien con índices de diversidad beta propiamente dichos (Magurran, 2004).

- *Diversidad Gamma*. Es la riqueza en especies [tipos de paisajes] de un grupo de hábitats [regiones] que resulta como consecuencia de la diversidad alfa de las comunidades individuales y del grado de diferenciación entre ellas (diversidad beta) (Moreno, 2001). Uno de los principales métodos para su evaluación es el de Schluter y Ricklefs (1993), quienes proponen la medición de la diversidad gamma con base en los componentes alfa, beta y la dimensión espacial.

4.3.2.3.1.1 MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA DIVERSIDAD ALFA

- (S) *Riqueza específica*
 Número de especies [tipos de paisajes] presentes en una comunidad [región] (Magurran, 2004).
- (A) *Abundancia*
 Número de organismos [paisajes] presentes en una comunidad [región] (Magurran, 2004).
- (Ar) *Abundancia relativa*
 Número de organismos [paisajes] por especie [tipo de paisaje] presentes en una comunidad [región] (Magurran, 2004).
- (C) *Composición*
 Listado de especies [tipos de paisajes] y organismos [paisajes] presentes en una comunidad [región] (Magurran, 2004).
- (H') *Índice de Diversidad de Shannon-Wiener*
 Expresa la uniformidad de los valores de importancia a través de todas las especies [tipos de paisajes] de la muestra. Mide el grado promedio de incertidumbre en predecir a que especie pertenecerá un individuo escogido al azar de una colección (Magurran, 2004). Asume que los individuos [paisajes] son seleccionados al azar y que todas las especies [tipos de paisajes] están representadas en la muestra. Adquiere valores entre cero, cuando hay una sola especie, y el logaritmo de S, cuando todas las especies están representadas por el mismo número de individuos (Magurran, 2004).

$$H' = - \sum p_i \ln p_i$$

Donde:

p_i = Proporción del número de individuos de la especie i con respecto al número de individuos totales de la comunidad (N_i/N_t).

N_i = Número de individuos de la especie i.

N_t = Número total de individuos de la comunidad.

- (E) *Índice de Equitatividad de Shannon-Wiener*
 Mide la proporción de la diversidad observada con relación a la máxima diversidad esperada, en otras palabras, que tan cercano está el valor calculado de diversidad al valor máximo de diversidad que se podría obtener si las abundancias de todas las especies [tipos de paisajes] fueran iguales. Su valor va de 0 a 1, de forma que 1 corresponde a situaciones donde todas las especies son igualmente abundantes (Magurran, 2004).

$$E = \frac{H'}{H_{max}}$$

Donde:

$$H_{max} = \ln S$$

- (D) *Índice de Simpson (Dominancia)*

Manifiesta la probabilidad de que dos individuos [paisajes] tomados al azar de una muestra sean de la misma especie [tipo de paisaje]. Está fuertemente influido por la importancia de las especies [tipos de paisajes] más dominantes (Magurran, 2004). Al ser su valor inverso a la equidad, la diversidad puede calcularse como 1/D.

$$\text{Índice de Simpson (Dominancia)} D = \sum p_i^2$$

$$\text{Índice de Diversidad de Simpson } D' = \frac{1}{\sum p_i^2}$$

Donde:

p_i = Abundancia proporcional de la especie i , es decir, el número de individuos de la especie i dividido entre el número total de individuos de la muestra.

4.3.2.3.1.2 MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA DIVERSIDAD BETA

- (J) *Coefficiente de Similitud de Jaccard*

Expresa el grado (0-1) en el que dos muestras [regiones] son semejantes por las especies [tipos de paisajes] presentes en ellas, por lo que es una medida inversa de la diversidad beta, que se refiere al cambio de especies [tipos de paisajes] entre dos muestras [regiones] (Magurran, 2004). Sin embargo, a partir del valor de similitud (s) se puede calcular la disimilitud (d) entre las muestras: $d=1-s$ (Magurran, 2004).

$$J = \frac{c}{a + b - c}$$

Donde:

a = Número de especies presentes en el sitio A.

b = Número de especies presentes en el sitio B.

c = Número de especies presentes en ambos sitios A y B.

4.3.2.3.1.3 MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA DIVERSIDAD GAMMA

- (G) *Diversidad Gamma de Schluter y Ricklefs*

Se expresa en número de especies [tipos de paisajes]. Su valor suele aproximarse al número total de especies [tipos de paisajes] registradas en todas las comunidades [regiones] (Moreno, 2001).

$\text{Gamma} = \text{Diversidad Alfa Promedio} \times \text{Diversidad Beta} \times \text{Dimensión de la Muestra}$

Donde:

Diversidad Alfa Promedio = Número promedio de especies en una comunidad.

Diversidad Beta = Inverso de la dimensión específica, es decir, 1/número promedio de comunidades ocupadas por una especie.

Dimensión de la Muestra = Número total de comunidades.

4.3.2.3.2 CÁLCULOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS PRIORITARIAS DE CONSERVACIÓN

- (Amire) *Área mínima de representatividad específica*

Es el área más pequeña que representa adecuadamente la composición de especies [tipos de paisajes] en una comunidad [región]. Es importante señalar, que si bien el área mínima de representatividad específica es aplicable en gran parte de las comunidades biológicas, ésta ve reducida su efectividad práctica en aquellas comunidades con baja equitatividad, o donde su reducción proporcional no es posible.

- (Amadae) *Área de mayor diversidad alfa específica*
 Es el área que agrupa las comunidades [regiones] con mayor diversidad alfa dentro de un grupo de comunidades.
- (Amadbe) *Área de mayor diversidad beta específica*
 Es el área que agrupa las comunidades [regiones] con mayor diversidad beta dentro de un grupo de comunidades.
- (Amirre) *Área mínima representativa de riqueza específica*
 Es el área más pequeña que representa adecuadamente la riqueza de especies [tipos de paisajes] en una comunidad [región].
- (Amare) *Área de mayor riqueza específica*
 Es el área que agrupa las comunidades [regiones] con mayor riqueza dentro de un grupo de comunidades.

Dichas áreas pueden ser definidas a partir de dos procedimientos, dependiendo del carácter puntual o poligonal de las especies:

1) *Método Areográfico*

Diseñado para comunidades formadas por entidades puntuales, este método biogeográfico-ecológico transforma una muestra puntual en una muestra de unidades espaciales. El procedimiento areográfico para dibujar el área de distribución deriva del concepto de árbol de máxima conectividad. Los puntos se unen por medio de un grafo abierto (que no forme circuitos), que minimice el recorrido entre cada punto de la nube. El valor de los arcos, es decir, de los segmentos que unen dos puntos, se somete a elaboración estadística, para obtener el índice de propinquidad media que se utiliza como radio para trazar un círculo alrededor de cada punto (**Figura 204**). El círculo en cuestión representa la unidad elemental del área de distribución. De la unión de las unidades elementales, resulta el perfil del área de distribución (Zunino, y otros, 2003).

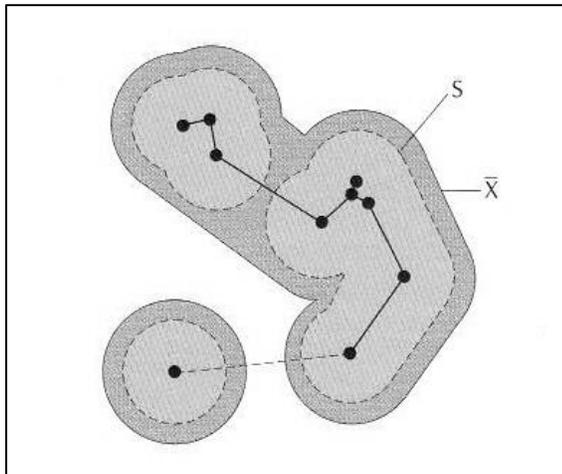


Figura 204. Representación de un área de distribución según el método areográfico en un ejemplo ficticio

Reproducido de (Zunino, y otros, 2003)

Las unidades básicas –relativas a cada punto– han sido trazadas utilizando como radio la media aritmética \bar{X} de los arcos, o la desviación estándar (S).

2) *Agrupamiento Simple*

En comunidades formadas por entidades poligonales, basta con el agrupamiento de la muestra mínima de representatividad específica para generar el área de distribución correspondiente.

- (Vi) Valor de importancia de la especie *i*
 Este método permite determinar la relevancia de una especie [tipo de paisaje] dentro de su comunidad [región], a partir de su densidad, frecuencia¹²⁷ y dominancia relativa.

$$Vi = \text{Densidad relativa} + \text{Frecuencia relativa} + \text{Dominancia relativa}$$

Donde:

$$\text{Densidad relativa} = \frac{\text{número de individuos de la sp } i}{\text{número total de individuos de la comunidad}}$$

$$\text{Frecuencia relativa} = \frac{\text{Frecuencia de la sp } i}{\text{Sumatoria de los valores de frecuencia de todas las spp}}$$

$$\text{Dominancia relativa} = \frac{\text{Sumatoria del tamaño de la sp } i}{\text{Sumatoria de todos los tamaños de todas las spp}}$$

Tamaño de la sp i (cobertura, diámetro, altura, volúmen, peso seco)

Integrando los postulados y las teorías expuestas, y atendiendo a la amplia aplicabilidad de las escalas de diversidad alfa, beta y gamma, la geodiversidad se clasifica de la siguiente manera:

Tabla 55. Clasificación de la Geodiversidad

| Nivel de organización | | | Escala | | | Escala | | | Cat. | | | |
|-----------------------|----------|------------|--------|---|---|----------------|-----------|---|------|---|---------------------|--------|
| Procesos | Esencial | Genotípica | α | β | γ | Representativa | Sistémica | α | β | γ | Intergeomorfológica | |
| | | | α | β | γ | | Funcional | α | β | γ | Intrageomorfológica | |
| Paisajes | | Fenotípica | α | β | γ | | Sistémica | α | β | γ | Intergeomorfológica | Orden |
| | | | α | β | γ | | Funcional | α | β | γ | Intrageomorfológica | Género |
| Regiones | | | | | | | α | β | γ | | Tipo | |
| | | | | | | | α | β | γ | | Subtipo | |
| | | | | | | | Sistémica | α | β | γ | Intergeomorfológica | Orden |
| | | | | | | | Funcional | α | β | γ | Intrageomorfológica | Genero |

(Peña Ramírez, 2012)

Con base en la caracterización geomorfológica y determinación taxonómica del paisaje kárstico en el PEST se resolvió evaluar los siguientes tipos de geodiversidad:

Tabla 56. Tipos de geodiversidad seleccionadas para su evaluación

| Nivel de organización | | | Escala | | | Escala | | | Cat. | | | |
|-----------------------|----------|--------------------------|--------|---|---|----------------|-----------|---|------|---|---------------------|--------|
| Procesos | Esencial | Genotípica | α | β | γ | Representativa | Sistémica | α | β | γ | Intergeomorfológica | |
| | | | α | β | γ | | Funcional | α | β | γ | Intrageomorfológica | |
| Paisajes | | Fenotípica (Morfológica) | α | β | γ | | Sistémica | α | β | γ | Intergeomorfológica | Orden |
| | | | α | β | γ | | Funcional | α | β | γ | Intrageomorfológica | Género |
| Regiones | | | | | | | α | β | γ | | Tipo | |
| | | | | | | | α | β | γ | | Subtipo | |
| | | | | | | | Sistémica | α | β | γ | Intergeomorfológica | Orden |
| | | | | | | | Funcional | α | β | γ | Intrageomorfológica | Genero |

(Peña Ramírez, 2012)

¹²⁷ La frecuencia absoluta de una variable estadística es el número de veces que aparece en la muestra dicho valor de la variable.

La evaluación de la geodiversidad fenotípica de tipo morfológica, se basó en la composición tipológica de colinas kársticas residuales de cada paisaje kárstico. Esto, con el propósito de asentar, a nivel de diversidad, la relevancia evolutiva y descriptiva de los sistemas de clasificación de las escuelas karstológica tradicional e indonesio-norteamericana. Además de que las colinas kársticas residuales poseen una gran reputación estética entre las ANPs con desarrollo geoturístico (International Union for Conservation of Nature. World Heritage Convention, 2008).

4.3.2.4 FUNDAMENTACIÓN Y DISEÑO DEL MÉTODO PARA LA ESTIMACIÓN DE LOS VALORES DE LA GEODIVERSIDAD

Con el propósito de calificar los valores de la geodiversidad en el Parque Estatal de la Sierra de Tabasco, se diseñó un método de estimación cualitativa basado en el análisis de la caracterización geográfica y geomorfológica del mismo (véase 2.5 y 4.1) (Tabla 57).

Tabla 57. Estimación de los valores de la geodiversidad

| Valores de la geodiversidad | Criterios y medios de estimación | Parámetros de evaluación cualitativa | |
|-----------------------------|---|--------------------------------------|-------------------|
| | | Binario | Magnitud evaluada |
| Intrínseco | Grado de conservación del paisaje geomorfológico | | Bajo, Medio, Alto |
| | Ortofotos digitales, Modelo de Ordenamiento Ecológico del Estado de Tabasco | | |
| Cultural | Manifestaciones de valor cultural | Presencia/Ausencia | Bajo, Medio, Alto |
| | Mapa Turístico del PEST | | |
| Estético | Estado evolutivo del paisaje kárstico | | Bajo, Medio, Alto |
| | Caracterización geomorfológica del PEST | | |
| Económico | Riqueza litológica | | Bajo, Medio, Alto |
| | Recursos renovables | | Bajo, Medio, Alto |
| | ANPs con desarrollo geoturístico | | Bajo, Medio, Alto |
| | Caracterización geográfica del PEST | | |
| Científico y Educativo | Estado evolutivo del paisaje kárstico | | Bajo, Medio, Alto |
| | Registro de la evolución geológica y biológica | | Bajo, Medio, Alto |
| | Caracterización geomorfológica del PEST | | |
| Funcional | Ecosistemas soportados | | Bajo, Medio, Alto |
| | Recursos geológicos almacenados | | Bajo, Medio, Alto |
| | Caracterización geográfica del PEST | | |
| | Caracterización geomorfológica del PEST | | |

(Peña Ramírez, 2012)

4.3.3 PROPIEDADES EMERGENTES Y VALORES DE LA GEODIVERSIDAD DEL PAISAJE KÁRSTICO EN EL PARQUE ESTATAL DE LA SIERRA DE TABASCO

4.3.3.1 PROPIEDADES EMERGENTES DEL PAISAJE KÁRSTICO EN EL PARQUE ESTATAL DE LA SIERRA DE TABASCO

4.3.3.1.1 GEODIVERSIDAD ESENCIAL DE LOS PAISAJES KÁRSTICOS

4.3.3.1.1.1 GEODIVERSIDAD GENOTÍPICA SISTÉMICA (INTERGEOMORFOLÓGICA)

4.3.3.1.1.1.1 DIVERSIDAD ALFA

Con base en la caracterización geomorfológica de los paisajes kársticos en el PEST, y a propósito de evaluar su geodiversidad genotípica sistémica alfa, se resolvió asignar, a cada proceso geomorfológico una dimensión cuantitativa en función de su dominancia o grado de subdominancia dentro de cada paisaje (**Tabla 58**) (Peña Ramírez, 2012). La riqueza proceso-geomorfológica del PEST se describe en la **Tabla 59**. Los cálculos de geodiversidad alfa se enlistan en la **Tabla 60** y su resumen en la **Tabla 61**. El **Mapa 29** muestra la diversidad H' y riqueza de procesos geomorfológicos dentro del PEST.

Tabla 58. Dimensión cuantitativa de los procesos geomorfológicos en función de su dominancia en el paisaje

| Proceso geomorfológico | Grado | Valor asignado |
|------------------------|-------|----------------|
| Dominante | - | 4 |
| Subdominante | 1 | 3 |
| | 2 | 2 |
| | 3 | 1 |

Tabla 59. Riqueza proceso-geomorfológica del Parque Estatal de la Sierra de Tabasco

| Id | Proceso geomorfológico |
|------|---|
| DIS | Disolución |
| ELIN | Erosión lineal en función del fracturamiento regional |
| EFLU | Erosión fluvial en función de la pendiente regional |
| APL | Aplanamiento por corrosión |
| ACU | Acumulación detrítica en función de la pendiente regional |

Tabla 60. Cálculos de geodiversidad alfa de procesos geomorfológicos

| Paisaje 1. Karst laberíntico cónico Coconá | | | | | |
|---|------|---------|---------|-----------|---------------|
| Proceso | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ |
| ELIN | 4 | 0.4 | 0.16 | -0.92 | -0.37 |
| DIS | 3 | 0.3 | 0.09 | -1.20 | -0.36 |
| EFLU | 2 | 0.2 | 0.04 | -1.61 | -0.32 |
| APL | 1 | 0.1 | 0.01 | -2.30 | -0.23 |
| S=4 | A=10 | D=0.3 | | | H'=1.28 |
| lnS=1.39 | | D'=3.33 | | | E=0.92 |
| Paisaje 2. Karst laberíntico cónico Sierra Madrigal | | | | | |
| Proceso | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ |
| ELIN | 4 | 0.4 | 0.16 | -0.92 | -0.37 |
| DIS | 3 | 0.3 | 0.09 | -1.20 | -0.36 |
| EFLU | 2 | 0.2 | 0.04 | -1.61 | -0.32 |
| S=3 | A=9 | D=0.29 | | | H'=1.05 |
| lnS=1.10 | | D'=3.45 | | | E=0.95 |
| Paisaje 3. Karst poligonal cónico San José Puyacatengo (Chapingo) | | | | | |
| Proceso | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ |
| DIS | 4 | 0.4 | 0.16 | -0.92 | -0.37 |
| ELIN | 3 | 0.3 | 0.09 | -1.20 | -0.36 |
| EFLU | 2 | 0.2 | 0.04 | -1.61 | -0.32 |
| S=3 | A=9 | D=0.29 | | | H'=1.05 |
| lnS=1.10 | | D'=3.45 | | | E=0.95 |

| Paisaje 4. Karst poligonal cónico Vicente Guerrero (El Guanaj) | | | | | | |
|---|------|-------|---------|-----------|---------------|---------|
| Proceso | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| DIS | 4 | 0.4 | 0.16 | -0.92 | -0.37 | |
| ELIN | 3 | 0.3 | 0.09 | -1.20 | -0.36 | |
| EFLU | 2 | 0.2 | 0.04 | -1.61 | -0.32 | |
| S=3 | A=9 | | D=0.29 | | | H'=1.05 |
| lnS=1.10 | | | D'=3.45 | | | E=0.95 |
| Paisaje 5. Fluviokarst activo cónico Arroyo Cuncubac | | | | | | |
| Proceso | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| EFLU | 4 | 0.4 | 0.16 | -0.92 | -0.37 | |
| ELIN | 3 | 0.3 | 0.09 | -1.20 | -0.36 | |
| DIS | 2 | 0.2 | 0.04 | -1.61 | -0.32 | |
| S=3 | A=9 | | D=0.29 | | | H'=1.05 |
| lnS=1.10 | | | D'=3.45 | | | E=0.95 |
| Paisaje 6. Fluviokarst activo cónico Arroyo Libertad | | | | | | |
| Proceso | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| EFLU | 4 | 0.4 | 0.16 | -0.92 | -0.37 | |
| ELIN | 3 | 0.3 | 0.09 | -1.20 | -0.36 | |
| DIS | 2 | 0.2 | 0.04 | -1.61 | -0.32 | |
| S=3 | A=9 | | D=0.29 | | | H'=1.05 |
| lnS=1.10 | | | D'=3.45 | | | E=0.95 |
| Paisaje 7. Karst poligonal cónico Cerro La Iglesia | | | | | | |
| Proceso | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| DIS | 4 | 0.4 | 0.16 | -0.92 | -0.37 | |
| ELIN | 3 | 0.3 | 0.09 | -1.20 | -0.36 | |
| EFLU | 2 | 0.2 | 0.04 | -1.61 | -0.32 | |
| APL | 1 | 0.1 | 0.01 | -2.30 | -0.23 | |
| S=4 | A=10 | | D=0.3 | | | H'=1.28 |
| lnS=1.39 | | | D'=3.33 | | | E=0.92 |
| Paisaje 8. Karst residual cónico Poaná | | | | | | |
| Proceso | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| APL | 4 | 0.4 | 0.16 | -0.92 | -0.37 | |
| DIS | 3 | 0.3 | 0.09 | -1.20 | -0.36 | |
| ACU | 2 | 0.2 | 0.04 | -1.61 | -0.32 | |
| ELIN | 1 | 0.1 | 0.01 | -2.30 | -0.23 | |
| S=4 | A=10 | | D=0.3 | | | H'=1.28 |
| lnS=1.39 | | | D'=3.33 | | | E=0.92 |
| Paisaje 9. Karst laberintico cónico Sierra Poaná Oeste | | | | | | |
| Proceso | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| ELIN | 4 | 0.4 | 0.16 | -0.92 | -0.37 | |
| DIS | 3 | 0.3 | 0.09 | -1.20 | -0.36 | |
| EFLU | 2 | 0.2 | 0.04 | -1.61 | -0.32 | |
| APL | 1 | 0.1 | 0.01 | -2.30 | -0.23 | |
| S=4 | A=10 | | D=0.3 | | | H'=1.28 |
| lnS=1.39 | | | D'=3.33 | | | E=0.92 |
| Paisaje 10. Karst residual cónico Lomas Alegres Tercera Sección (San Antonio) | | | | | | |
| Proceso | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| APL | 4 | 0.4 | 0.16 | -0.92 | -0.37 | |
| DIS | 3 | 0.3 | 0.09 | -1.20 | -0.36 | |
| ACU | 2 | 0.2 | 0.04 | -1.61 | -0.32 | |
| S=3 | A=9 | | D=0.29 | | | H'=1.05 |
| lnS=1.10 | | | D'=3.45 | | | E=0.95 |
| Paisaje 11. Fluviokarst activo cónico Arroyo Sierra Poaná | | | | | | |
| Proceso | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| EFLU | 4 | 0.4 | 0.16 | -0.92 | -0.37 | |
| ELIN | 3 | 0.3 | 0.09 | -1.20 | -0.36 | |
| DIS | 2 | 0.2 | 0.04 | -1.61 | -0.32 | |
| APL | 1 | 0.1 | 0.01 | -2.30 | -0.23 | |
| S=4 | A=10 | | D=0.3 | | | H'=1.28 |
| lnS=1.39 | | | D'=3.33 | | | E=0.92 |

| Paisaje 12. Karst poligonal cónico Sierra Poaná Este | | | | | | |
|---|------|-------|---------|-----------|---------------|---------|
| Proceso | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| DIS | 4 | 0.4 | 0.16 | -0.92 | -0.37 | |
| ELIN | 3 | 0.3 | 0.09 | -1.20 | -0.36 | |
| EFLU | 2 | 0.2 | 0.04 | -1.61 | -0.32 | |
| APL | 1 | 0.1 | 0.01 | -2.30 | -0.23 | |
| S=4 | A=10 | | D=0.3 | | | H'=1.28 |
| lnS=1.39 | | | D'=3.33 | | | E=0.92 |
| Paisaje 13. Karst laberíntico cónico Cerro Chile | | | | | | |
| Proceso | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| ELIN | 4 | 0.4 | 0.16 | -0.92 | -0.37 | |
| DIS | 3 | 0.3 | 0.09 | -1.20 | -0.36 | |
| EFLU | 2 | 0.2 | 0.04 | -1.61 | -0.32 | |
| APL | 1 | 0.1 | 0.01 | -2.30 | -0.23 | |
| S=4 | A=10 | | D=0.3 | | | H'=1.28 |
| lnS=1.39 | | | | D'=3.33 | | |
| Paisaje 14. Karst laberíntico cónico Cerro Mico | | | | | | |
| Proceso | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| ELIN | 4 | 0.4 | 0.16 | -0.92 | -0.37 | |
| DIS | 3 | 0.3 | 0.09 | -1.20 | -0.36 | |
| EFLU | 2 | 0.2 | 0.04 | -1.61 | -0.32 | |
| APL | 1 | 0.1 | 0.01 | -2.30 | -0.23 | |
| S=4 | A=10 | | D=0.3 | | | H'=1.28 |
| lnS=1.39 | | | | D'=3.33 | | |
| Paisaje 15. Karst laberíntico cónico Tapijulapa | | | | | | |
| Proceso | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| ELIN | 4 | 0.4 | 0.16 | -0.92 | -0.37 | |
| DIS | 3 | 0.3 | 0.09 | -1.20 | -0.36 | |
| EFLU | 2 | 0.2 | 0.04 | -1.61 | -0.32 | |
| S=3 | A=9 | | D=0.29 | | | H'=1.05 |
| lnS=1.10 | | | | D'=3.45 | | |
| Paisaje 16. Karst poligonal cónico San Manuel | | | | | | |
| Proceso | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| DIS | 4 | 0.4 | 0.16 | -0.92 | -0.37 | |
| ELIN | 3 | 0.3 | 0.09 | -1.20 | -0.36 | |
| EFLU | 2 | 0.2 | 0.04 | -1.61 | -0.32 | |
| APL | 1 | 0.1 | 0.01 | -2.30 | -0.23 | |
| S=4 | A=10 | | D=0.3 | | | H'=1.28 |
| lnS=1.39 | | | | D'=3.33 | | |
| Paisaje 17. Fluviokarst activo cónico Arroyo Piedra Negra | | | | | | |
| Proceso | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| EFLU | 4 | 0.4 | 0.16 | -0.92 | -0.37 | |
| ELIN | 3 | 0.3 | 0.09 | -1.20 | -0.36 | |
| DIS | 2 | 0.2 | 0.04 | -1.61 | -0.32 | |
| S=3 | A=9 | | D=0.29 | | | H'=1.05 |
| lnS=1.10 | | | | D'=3.45 | | |
| Paisaje 18. Karst laberíntico cónico Agua Escondida | | | | | | |
| Proceso | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| ELIN | 4 | 0.4 | 0.16 | -0.92 | -0.37 | |
| DIS | 3 | 0.3 | 0.09 | -1.20 | -0.36 | |
| EFLU | 2 | 0.2 | 0.04 | -1.61 | -0.32 | |
| APL | 1 | 0.1 | 0.01 | -2.30 | -0.23 | |
| S=4 | A=10 | | D=0.3 | | | H'=1.28 |
| lnS=1.39 | | | | D'=3.33 | | |
| Paisaje 19. Karst poligonal cónico Xicoténcatl | | | | | | |
| Proceso | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| DIS | 4 | 0.4 | 0.16 | -0.92 | -0.37 | |
| ELIN | 3 | 0.3 | 0.09 | -1.20 | -0.36 | |
| EFLU | 2 | 0.2 | 0.04 | -1.61 | -0.32 | |
| APL | 1 | 0.1 | 0.01 | -2.30 | -0.23 | |
| S=4 | A=10 | | D=0.3 | | | H'=1.28 |
| lnS=1.39 | | | | D'=3.33 | | |

Tabla 61. Geodiversidad alfa de procesos geomorfológicos

| Paisaje | S | A | H' | E | D | D' |
|---------|---|----|------|------|------|------|
| 1 | 4 | 10 | 1.28 | 0.92 | 0.30 | 3.33 |
| 2 | 3 | 9 | 1.05 | 0.95 | 0.29 | 3.45 |
| 3 | 3 | 9 | 1.05 | 0.95 | 0.29 | 3.45 |
| 4 | 3 | 9 | 1.05 | 0.95 | 0.29 | 3.45 |
| 5 | 3 | 9 | 1.05 | 0.95 | 0.29 | 3.45 |
| 6 | 3 | 9 | 1.05 | 0.95 | 0.29 | 3.45 |
| 7 | 4 | 10 | 1.28 | 0.92 | 0.30 | 3.33 |
| 8 | 4 | 10 | 1.28 | 0.92 | 0.30 | 3.33 |
| 9 | 4 | 10 | 1.28 | 0.92 | 0.30 | 3.33 |
| 10 | 3 | 9 | 1.05 | 0.95 | 0.29 | 3.45 |
| 11 | 4 | 10 | 1.28 | 0.92 | 0.30 | 3.33 |
| 12 | 4 | 10 | 1.28 | 0.92 | 0.30 | 3.33 |
| 13 | 4 | 10 | 1.28 | 0.92 | 0.30 | 3.33 |
| 14 | 4 | 10 | 1.28 | 0.92 | 0.30 | 3.33 |
| 15 | 3 | 9 | 1.05 | 0.95 | 0.29 | 3.45 |
| 16 | 4 | 10 | 1.28 | 0.92 | 0.30 | 3.33 |
| 17 | 3 | 9 | 1.05 | 0.95 | 0.29 | 3.45 |
| 18 | 4 | 10 | 1.28 | 0.92 | 0.30 | 3.33 |
| 19 | 4 | 10 | 1.28 | 0.92 | 0.30 | 3.33 |

La riqueza específica (S) promedio de la muestra es de 3.58, la equitatividad (E) promedio de 0.93, y la dominancia (D) promedio de 0.29. La diversidad alfa promedio de la muestra es de 1.18 para H' y 3.38 para D'.

4.3.3.1.1.1.2 DIVERSIDAD BETA

Ésta fue calculada a partir de la matriz binaria de datos (Tabla 62) y mediante el software PASW Statistics 18. Los resultados correspondientes se muestran en la matriz de distancias (Tabla 63), el historial de conglomeración (Tabla 64) y el dendrograma de vinculación media (entre paisajes) (Figura 205). La distribución espacial de la diversidad beta de procesos geomorfológicos se muestra en el Mapa 30.

Tabla 62. Matriz de presencia/ausencia de procesos geomorfológicos

| Proceso | Paisajes | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| DIS | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| ELIN | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| EFLU | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| APL | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| ACU | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

La similitud promedio de la muestra es de 0.94, mientras que la diversidad beta promedio (disimilitud) es de 0.06.

4.3.3.1.1.1.3 DIVERSIDAD GAMMA

La diversidad gamma basada en H' resultó con un valor de 1.34, mientras que la basada en D' fue de 3.85.

$$Gamma = 1.18 (H') \times 0.06 \times 19 = 1.34$$

$$Gamma = 3.38 (D') \times 0.06 \times 19 = 3.85$$

Tabla 63. Matriz de distancias de procesos geomorfológicos

| Caso | Archivo matricial de entrada | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 | P10 | P11 | P12 | P13 | P14 | P15 | P16 | P17 | P18 | P19 |
| P1 | 1.000 | .750 | .750 | .750 | .750 | .750 | 1.000 | .800 | 1.000 | .400 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | .750 | 1.000 | .750 | 1.000 | 1.000 |
| P2 | .750 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | .750 | .400 | .750 | .200 | .750 | .750 | .750 | .750 | 1.000 | .750 | 1.000 | .750 | .750 |
| P3 | .750 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | .750 | .400 | .750 | .200 | .750 | .750 | .750 | .750 | 1.000 | .750 | 1.000 | .750 | .750 |
| P4 | .750 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | .750 | .400 | .750 | .200 | .750 | .750 | .750 | .750 | 1.000 | .750 | 1.000 | .750 | .750 |
| P5 | .750 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | .750 | .400 | .750 | .200 | .750 | .750 | .750 | .750 | 1.000 | .750 | 1.000 | .750 | .750 |
| P6 | .750 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | .750 | .400 | .750 | .200 | .750 | .750 | .750 | .750 | 1.000 | .750 | 1.000 | .750 | .750 |
| P7 | 1.000 | .750 | .750 | .750 | .750 | .750 | 1.000 | .800 | 1.000 | .400 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | .750 | 1.000 | .750 | 1.000 | 1.000 |
| P8 | .800 | .400 | .400 | .400 | .400 | .400 | .800 | 1.000 | .800 | .750 | .800 | .800 | .800 | .800 | .400 | .800 | .400 | .800 | .800 |
| P9 | 1.000 | .750 | .750 | .750 | .750 | .750 | 1.000 | .800 | 1.000 | .400 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | .750 | 1.000 | .750 | 1.000 | 1.000 |
| P10 | .400 | .200 | .200 | .200 | .200 | .200 | .400 | .750 | .400 | 1.000 | .400 | .400 | .400 | .400 | .200 | .400 | .200 | .400 | .400 |
| P11 | 1.000 | .750 | .750 | .750 | .750 | .750 | 1.000 | .800 | 1.000 | .400 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | .750 | 1.000 | .750 | 1.000 | 1.000 |
| P12 | 1.000 | .750 | .750 | .750 | .750 | .750 | 1.000 | .800 | 1.000 | .400 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | .750 | 1.000 | .750 | 1.000 | 1.000 |
| P13 | 1.000 | .750 | .750 | .750 | .750 | .750 | 1.000 | .800 | 1.000 | .400 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | .750 | 1.000 | .750 | 1.000 | 1.000 |
| P14 | 1.000 | .750 | .750 | .750 | .750 | .750 | 1.000 | .800 | 1.000 | .400 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | .750 | 1.000 | .750 | 1.000 | 1.000 |
| P15 | .750 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | .750 | .400 | .750 | .200 | .750 | .750 | .750 | .750 | 1.000 | .750 | 1.000 | .750 | .750 |
| P16 | 1.000 | .750 | .750 | .750 | .750 | .750 | 1.000 | .800 | 1.000 | .400 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | .750 | 1.000 | .750 | 1.000 | 1.000 |
| P17 | .750 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | .750 | .400 | .750 | .200 | .750 | .750 | .750 | .750 | 1.000 | .750 | 1.000 | .750 | .750 |
| P18 | 1.000 | .750 | .750 | .750 | .750 | .750 | 1.000 | .800 | 1.000 | .400 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | .750 | 1.000 | .750 | 1.000 | 1.000 |
| P19 | 1.000 | .750 | .750 | .750 | .750 | .750 | 1.000 | .800 | 1.000 | .400 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | .750 | 1.000 | .750 | 1.000 | 1.000 |

Tabla 64. Historial de conglomeración de procesos geomorfológicos

| Etapa | Conglomerado que se combina | | Coeficientes | Etapa en la que el conglomerado aparece por primera vez | | Próxima etapa |
|-------|-----------------------------|-----------------|--------------|---|-----------------|---------------|
| | Conglomerad o 1 | Conglomerad o 2 | | Conglomerad o 1 | Conglomerad o 2 | |
| 1 | 18 | 19 | 1.000 | 0 | 0 | 2 |
| 2 | 1 | 18 | 1.000 | 0 | 1 | 6 |
| 3 | 15 | 17 | 1.000 | 0 | 0 | 5 |
| 4 | 14 | 16 | 1.000 | 0 | 0 | 6 |
| 5 | 2 | 15 | 1.000 | 0 | 3 | 13 |
| 6 | 1 | 14 | 1.000 | 2 | 4 | 8 |
| 7 | 12 | 13 | 1.000 | 0 | 0 | 8 |
| 8 | 1 | 12 | 1.000 | 6 | 7 | 10 |
| 9 | 9 | 11 | 1.000 | 0 | 0 | 10 |
| 10 | 1 | 9 | 1.000 | 8 | 9 | 11 |
| 11 | 1 | 7 | 1.000 | 10 | 0 | 17 |
| 12 | 5 | 6 | 1.000 | 0 | 0 | 13 |
| 13 | 2 | 5 | 1.000 | 5 | 12 | 15 |
| 14 | 3 | 4 | 1.000 | 0 | 0 | 15 |
| 15 | 2 | 3 | 1.000 | 13 | 14 | 17 |
| 16 | 8 | 10 | .750 | 0 | 0 | 18 |
| 17 | 1 | 2 | .750 | 11 | 15 | 18 |
| 18 | 1 | 8 | .418 | 17 | 16 | 0 |

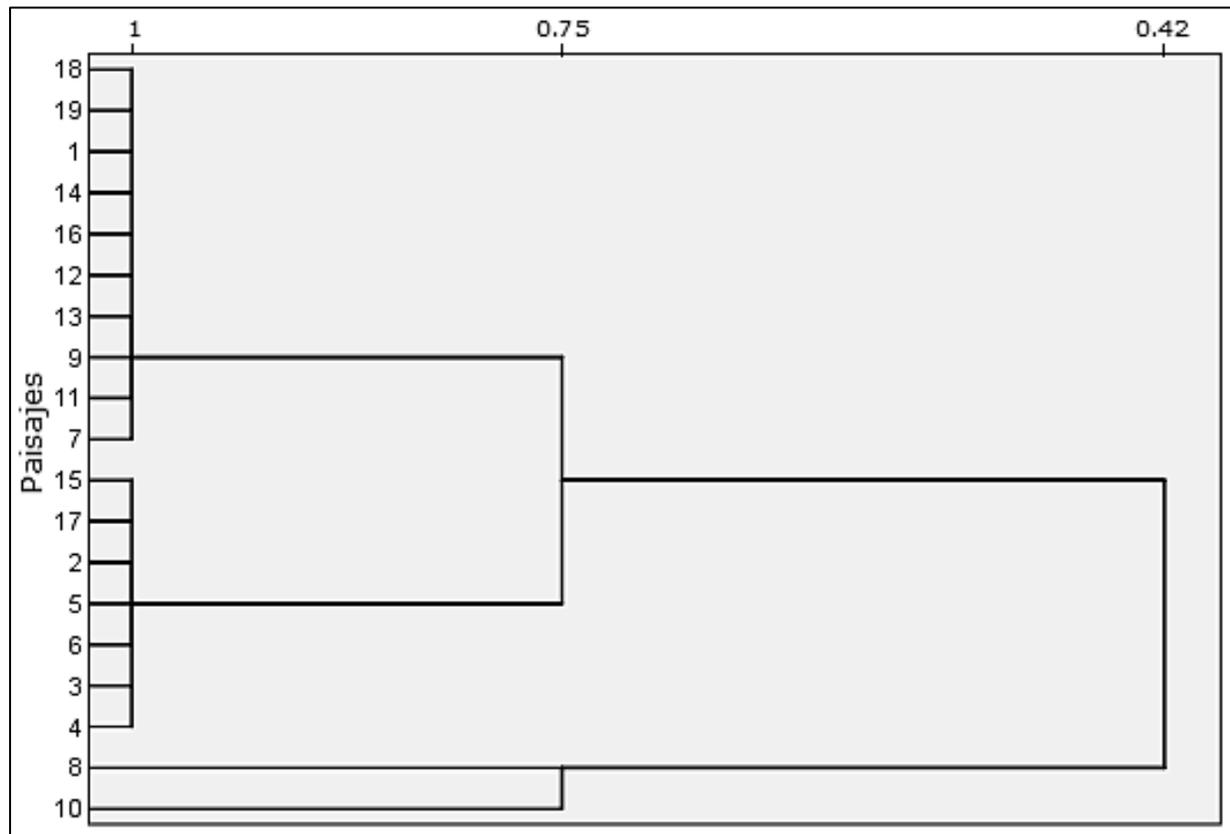
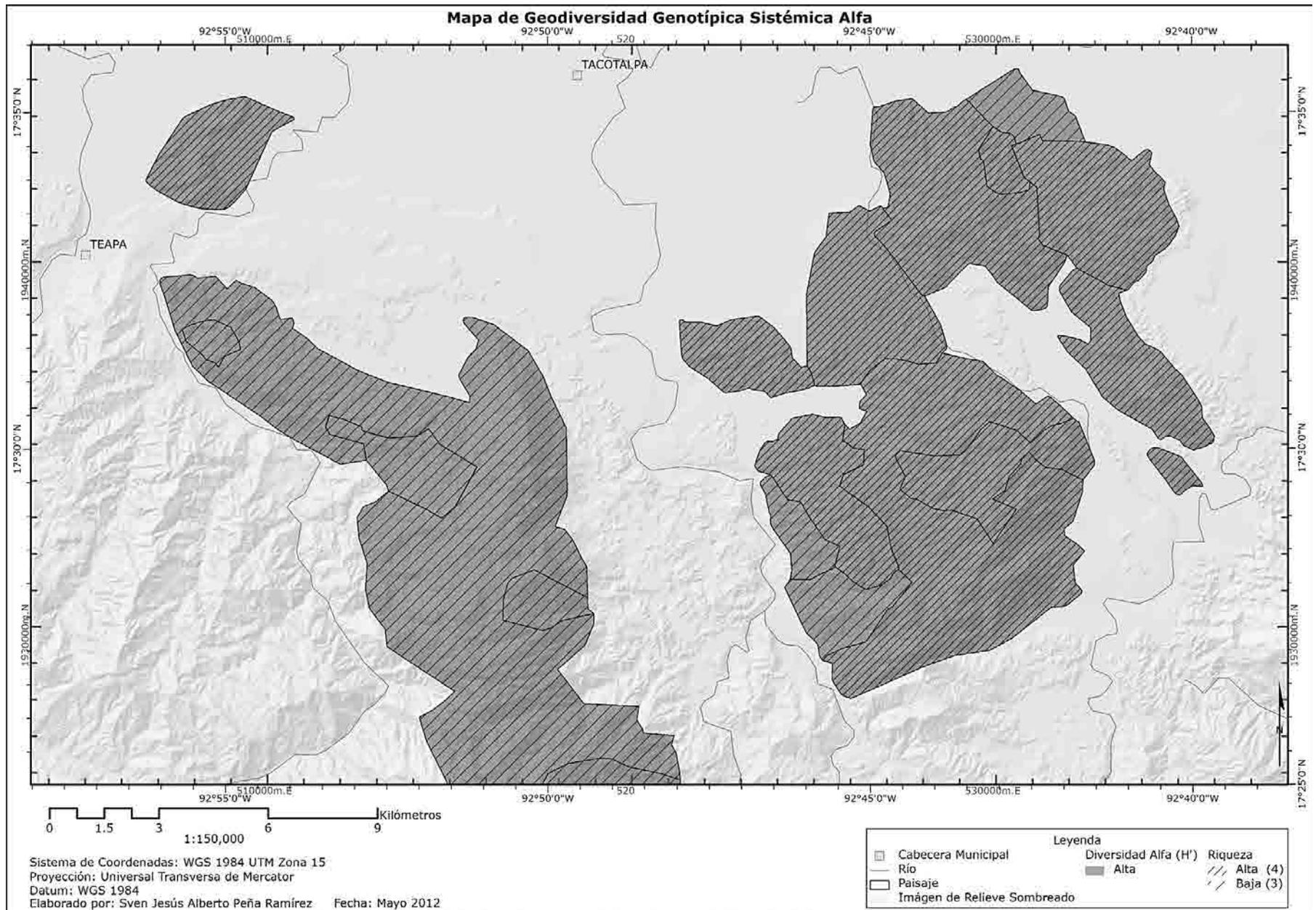
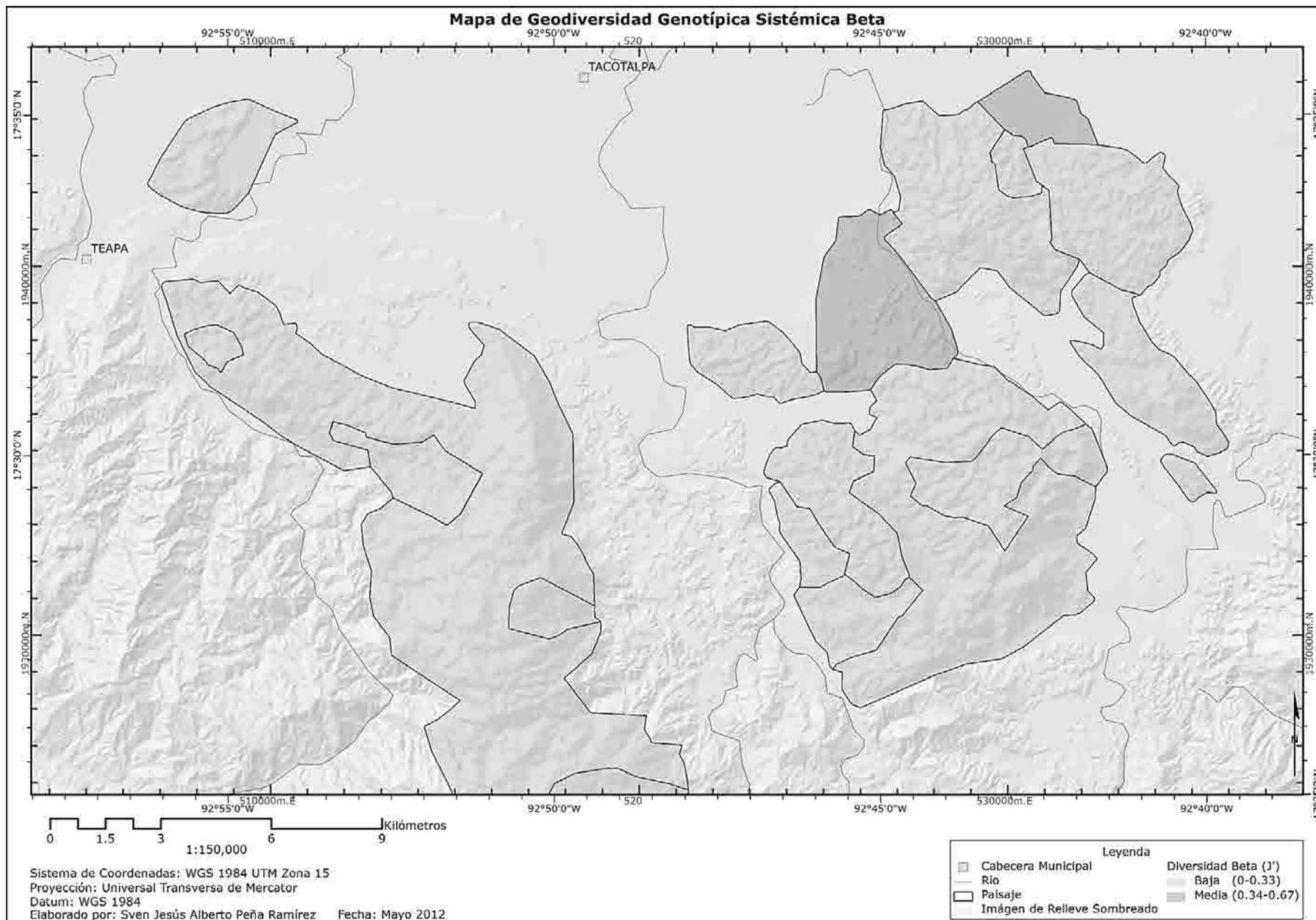


Figura 205. Dendrograma de vinculación media (entre paisajes) de procesos geomorfológicos



Mapa 29. Mapa de Geodiversidad Genotípica Sistémica Alfa



Mapa 30. Mapa de Geodiversidad Genotípica Sistémica Beta

4.3.3.1.1.2 GEODIVERSIDAD FENOTÍPICA MORFOLÓGICA (COLINAS KÁRSTICAS RESIDUALES)

4.3.3.1.1.2.1 DIVERSIDAD ALFA

Ésta fue evaluada con base en el tipo y número de colinas kársticas residuales presentes en cada paisaje (**Figura 133**). Los cálculos de geodiversidad alfa se enlistan en la **Tabla 65** y su resumen en la **Tabla 66**. El **Mapa 31** muestra la diversidad H' y riqueza de colinas kársticas residuales dentro del PEST.

Tabla 65. Cálculos de geodiversidad alfa de colinas kársticas residuales

| Paisaje 1. <i>Karst laberíntico cónico</i> Coconá | | | | | | |
|--|-------|-------|---------|-----------|---------------|--|
| CKR | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| Cúpula | 1 | 0.04 | 0.00 | -3.22 | -0.13 | |
| Cono | 24 | 0.89 | 0.79 | -0.12 | -0.11 | |
| Mogote | 2 | 0.07 | 0.00 | -2.66 | -0.19 | |
| S=3 | A=27 | | D=0.79 | | H'=0.43 | |
| lnS=1.10 | | | D'=1.26 | | E=0.39 | |
| Paisaje 2. <i>Karst laberíntico cónico</i> Sierra Madrigal | | | | | | |
| CKR | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| Cúpula | 18 | 0.11 | 0.01 | -2.21 | -0.24 | |
| Cono | 138 | 0.88 | 0.77 | -0.13 | -0.11 | |
| S=2 | A=156 | | D=0.78 | | H'=0.35 | |
| lnS=0.69 | | | D'=1.28 | | E=0.51 | |
| Paisaje 3. <i>Karst poligonal cónico</i> San José Puyacatengo (Chapingo) | | | | | | |
| CKR | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| Cúpula | 2 | 0.15 | 0.02 | -1.90 | -0.28 | |
| Cono | 11 | 0.85 | 0.72 | -0.16 | -0.14 | |
| S=2 | A=13 | | D=0.74 | | H'=0.42 | |
| lnS=0.69 | | | D'=1.35 | | E=0.61 | |
| Paisaje 4. <i>Karst poligonal cónico</i> Vicente Guerrero (El Guanal) | | | | | | |
| CKR | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| Cúpula | 7 | 0.41 | 0.17 | -0.89 | -0.36 | |
| Cono | 10 | 0.59 | 0.35 | -0.53 | -0.31 | |
| S=2 | A=17 | | D=0.52 | | H'=0.67 | |
| lnS=0.69 | | | D'=1.92 | | E=0.97 | |
| Paisaje 5. <i>Fluviokarst activo cónico</i> Arroyo Cuncubac | | | | | | |
| CKR | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| Cúpula | 1 | 0.14 | 0.02 | -1.97 | -0.27 | |
| Cono | 6 | 0.86 | 0.74 | -0.15 | -0.13 | |
| S=2 | A=7 | | D=0.76 | | H'=0.40 | |
| lnS=0.69 | | | D'=1.31 | | E=0.58 | |
| Paisaje 6. <i>Fluviokarst activo cónico</i> Arroyo Libertad | | | | | | |
| CKR | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| Cono | 9 | 1 | 1 | 0 | 0 | |
| S=1 | A=9 | | D=1 | | H'=0 | |
| lnS=0 | | | D'=1 | | E=0 | |
| Paisaje 7. <i>Karst poligonal cónico</i> Cerro La Iglesia | | | | | | |
| CKR | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| Cúpula | 8 | 0.13 | 0.02 | -2.04 | -0.26 | |
| Cono | 47 | 0.78 | 0.61 | -0.25 | -0.19 | |
| Mogote | 5 | 0.08 | 0.01 | -2.52 | -0.20 | |
| S=3 | A=60 | | D=0.64 | | H'=0.65 | |
| lnS=1.10 | | | D'=1.56 | | E=0.59 | |
| Paisaje 8. <i>Karst residual cónico</i> Poaná | | | | | | |
| CKR | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| Cono | 76 | 0.78 | 0.61 | -0.25 | -0.19 | |
| Mogote | 12 | 0.12 | 0.01 | -2.12 | -0.25 | |
| Torre | 9 | 0.09 | 0.01 | -2.41 | -0.22 | |
| S=3 | A=97 | | D=0.63 | | H'=0.66 | |
| lnS=1.10 | | | D'=1.59 | | E=0.6 | |

| Paisaje 9. Karst laberíntico cónico Sierra Poaná Oeste | | | | | | |
|---|-------|-------|---------|-----------|---------------|--|
| CKR | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| Cúpula | 3 | 0.02 | 0.00 | -3.91 | -0.08 | |
| Cono | 111 | 0.94 | 0.88 | -0.06 | -0.06 | |
| Mogote | 4 | 0.03 | 0.00 | -3.51 | -0.10 | |
| S=3 | A=118 | | D=0.88 | | H'=0.24 | |
| lnS=1.10 | | | D'=1.14 | | E=0.22 | |
| Paisaje 10. Karst residual cónico Lomas Alegres Tercera Sección (San Antonio) | | | | | | |
| CKR | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| Cono | 14 | 1 | 1 | 0 | 0 | |
| S=1 | A=14 | | D=1 | | H'=0 | |
| lnS=0 | | | D'=1 | | E=0 | |
| Paisaje 11. Fluviokarst activo cónico Arroyo Sierra Poaná | | | | | | |
| CKR | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| Cono | 11 | 1 | 1 | 0 | 0 | |
| S=1 | A=11 | | D=1 | | H'=0 | |
| lnS=0 | | | D'=1 | | E=0 | |
| Paisaje 12. Karst poligonal cónico Sierra Poaná Este | | | | | | |
| CKR | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| Cúpula | 11 | 0.10 | 0.01 | -2.30 | -0.23 | |
| Cono | 95 | 0.88 | 0.77 | -0.13 | -0.11 | |
| Mogote | 1 | 0.01 | 0.00 | -4.60 | -0.05 | |
| Torre | 1 | 0.01 | 0.00 | -4.60 | -0.05 | |
| S=4 | A=108 | | D=0.78 | | H'=0.44 | |
| lnS=1.39 | | | D'=1.28 | | E=0.32 | |
| Paisaje 13. Karst laberíntico cónico Cerro Chile | | | | | | |
| CKR | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| Cúpula | 1 | 0.02 | 0.00 | -3.91 | -0.08 | |
| Cono | 39 | 0.97 | 0.94 | -0.03 | -0.03 | |
| S=2 | A=40 | | D=0.94 | | H'=0.11 | |
| lnS=0.69 | | | D'=1.06 | | E=0.16 | |
| Paisaje 14. Karst laberíntico cónico Cerro Mico | | | | | | |
| CKR | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| Cono | 2 | 0.67 | 0.45 | -0.40 | -0.27 | |
| Mogote | 1 | 0.33 | 0.11 | -1.11 | -0.37 | |
| S=2 | A=3 | | D=0.56 | | H'=0.64 | |
| lnS=0.69 | | | D'=1.78 | | E=0.93 | |
| Paisaje 15. Karst laberíntico cónico Tapijulapa | | | | | | |
| CKR | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| Cono | 12 | 1 | 1 | 0 | 0 | |
| S=1 | A=12 | | D=1 | | H'=0 | |
| lnS=0 | | | D'=1 | | E=0 | |
| Paisaje 16. Karst poligonal cónico San Manuel | | | | | | |
| CKR | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| Cúpula | 1 | 0.01 | 0.00 | -4.60 | -0.05 | |
| Cono | 69 | 0.98 | 0.96 | -0.02 | -0.02 | |
| S=2 | A=70 | | D=0.96 | | H'=0.07 | |
| lnS=0.69 | | | D'=1.04 | | E=0.10 | |
| Paisaje 17. Fluviokarst activo cónico Arroyo Piedra Negra | | | | | | |
| CKR | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| Cúpula | 2 | 0.25 | 0.06 | -1.39 | -0.35 | |
| Cono | 6 | 0.75 | 0.56 | -0.29 | -0.22 | |
| S=2 | A=8 | | D=0.62 | | H'=0.57 | |
| lnS=0.69 | | | D'=1.61 | | E=0.83 | |
| Paisaje 18. Karst laberíntico cónico Agua Escondida | | | | | | |
| CKR | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ | |
| Cúpula | 5 | 0.04 | 0.00 | -3.22 | -0.13 | |
| Cono | 102 | 0.92 | 0.85 | -0.08 | -0.07 | |
| Torre | 4 | 0.04 | 0.00 | -3.22 | -0.13 | |
| S=3 | A=111 | | D=0.85 | | H'=0.33 | |
| lnS=1.10 | | | D'=1.18 | | E=0.30 | |

| Paisaje 19. Karst poligonal cónico Xicoténcatl | | | | | |
|--|------|-------|---------|-----------|---------------|
| CKR | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ |
| Cono | 49 | 0.98 | 0.96 | -0.02 | -0.02 |
| Torre | 1 | 0.02 | 0.00 | -3.91 | -0.08 |
| S=2 | A=50 | | D=0.96 | | H'=0.10 |
| lnS=0.69 | | | D'=1.04 | | E=0.14 |

Tabla 66. Geodiversidad alfa de colinas kársticas residuales

| Paisaje | S | A | H' | E | D | D' |
|---------|---|-----|------|------|------|------|
| 1 | 3 | 27 | 0.43 | 0.39 | 0.79 | 1.26 |
| 2 | 2 | 156 | 0.35 | 0.51 | 0.78 | 1.28 |
| 3 | 2 | 13 | 0.42 | 0.61 | 0.74 | 1.35 |
| 4 | 2 | 17 | 0.67 | 0.97 | 0.52 | 1.92 |
| 5 | 2 | 7 | 0.40 | 0.58 | 0.76 | 1.31 |
| 6 | 1 | 9 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 7 | 3 | 60 | 0.65 | 0.59 | 0.64 | 1.56 |
| 8 | 3 | 97 | 0.66 | 0.6 | 0.63 | 1.59 |
| 9 | 3 | 118 | 0.24 | 0.22 | 0.88 | 1.14 |
| 10 | 1 | 14 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 11 | 1 | 11 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 12 | 4 | 108 | 0.44 | 0.32 | 0.78 | 1.28 |
| 13 | 2 | 40 | 0.11 | 0.16 | 0.94 | 1.06 |
| 14 | 2 | 3 | 0.64 | 0.93 | 0.56 | 1.78 |
| 15 | 1 | 12 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 16 | 2 | 70 | 0.07 | 0.10 | 0.96 | 1.04 |
| 17 | 2 | 8 | 0.57 | 0.83 | 0.62 | 1.61 |
| 18 | 3 | 111 | 0.33 | 0.30 | 0.85 | 1.18 |
| 19 | 2 | 50 | 0.10 | 0.14 | 0.96 | 1.04 |

La riqueza específica (S) promedio de la muestra es de 2.16, la equitatividad (E) promedio de 0.38, y la dominancia (D) promedio de 0.81. La diversidad alfa promedio de la muestra es de 0.32 para H' y 1.28 para D'.

4.3.3.1.1.2.2 DIVERSIDAD BETA

Se calculó a partir de la matriz binaria de datos (Tabla 67). Los resultados correspondientes se muestran en la matriz de distancias (Tabla 68), el historial de conglomeración (Tabla 69) y el dendrograma de vinculación media (entre paisajes) (Figura 206). La distribución espacial de la diversidad beta de colinas kársticas residuales se muestra en el Mapa 32.

Tabla 67. Matriz de presencia/ausencia de colinas kársticas residuales

| CKR | Paisajes | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| Cúpula | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| Cono | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Mogote | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Torre | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |

La similitud promedio de la muestra es de 0.84, mientras que la diversidad beta promedio (disimilitud) es de 0.16.

4.3.3.1.1.2.3 DIVERSIDAD GAMMA

$$\text{Gamma} = 0.32 (H') \times 0.16 \times 19 = 0.97$$

$$\text{Gamma} = 1.28 (D') \times 0.16 \times 19 = 3.89$$

Tabla 68. Matriz de distancias de colinas kársticas residuales

| Caso | Archivo matricial de entrada | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 | P10 | P11 | P12 | P13 | P14 | P15 | P16 | P17 | P18 | P19 |
| P1 | 1.000 | .667 | .667 | .667 | .667 | .333 | 1.000 | .500 | 1.000 | .333 | .333 | .750 | .667 | .667 | .333 | .667 | .667 | .500 | .250 |
| P2 | .667 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | .500 | .667 | .250 | .667 | .500 | .500 | .500 | 1.000 | .333 | .500 | 1.000 | 1.000 | .667 | .333 |
| P3 | .667 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | .500 | .667 | .250 | .667 | .500 | .500 | .500 | 1.000 | .333 | .500 | 1.000 | 1.000 | .667 | .333 |
| P4 | .667 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | .500 | .667 | .250 | .667 | .500 | .500 | .500 | 1.000 | .333 | .500 | 1.000 | 1.000 | .667 | .333 |
| P5 | .667 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | .500 | .667 | .250 | .667 | .500 | .500 | .500 | 1.000 | .333 | .500 | 1.000 | 1.000 | .667 | .333 |
| P6 | .333 | .500 | .500 | .500 | .500 | 1.000 | .333 | .333 | .333 | 1.000 | 1.000 | .250 | .500 | .500 | 1.000 | .500 | .500 | .333 | .500 |
| P7 | 1.000 | .667 | .667 | .667 | .667 | .333 | 1.000 | .500 | 1.000 | .333 | .333 | .750 | .667 | .667 | .333 | .667 | .667 | .500 | .250 |
| P8 | .500 | .250 | .250 | .250 | .250 | .333 | .500 | 1.000 | .500 | .333 | .333 | .750 | .250 | .667 | .333 | .250 | .250 | .500 | .667 |
| P9 | 1.000 | .667 | .667 | .667 | .667 | .333 | 1.000 | .500 | 1.000 | .333 | .333 | .750 | .667 | .667 | .333 | .667 | .667 | .500 | .250 |
| P10 | .333 | .500 | .500 | .500 | .500 | 1.000 | .333 | .333 | .333 | 1.000 | 1.000 | .250 | .500 | .500 | 1.000 | .500 | .500 | .333 | .500 |
| P11 | .333 | .500 | .500 | .500 | .500 | 1.000 | .333 | .333 | .333 | 1.000 | 1.000 | .250 | .500 | .500 | 1.000 | .500 | .500 | .333 | .500 |
| P12 | .750 | .500 | .500 | .500 | .500 | .250 | .750 | .750 | .750 | .250 | .250 | 1.000 | .500 | .500 | .250 | .500 | .500 | .750 | .500 |
| P13 | .667 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | .500 | .667 | .250 | .667 | .500 | .500 | .500 | 1.000 | .333 | .500 | 1.000 | 1.000 | .667 | .333 |
| P14 | .667 | .333 | .333 | .333 | .333 | .500 | .667 | .667 | .667 | .500 | .500 | .500 | .333 | 1.000 | .500 | .333 | .333 | .250 | .333 |
| P15 | .333 | .500 | .500 | .500 | .500 | 1.000 | .333 | .333 | .333 | 1.000 | 1.000 | .250 | .500 | .500 | 1.000 | .500 | .500 | .333 | .500 |
| P16 | .667 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | .500 | .667 | .250 | .667 | .500 | .500 | .500 | 1.000 | .333 | .500 | 1.000 | 1.000 | .667 | .333 |
| P17 | .667 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | .500 | .667 | .250 | .667 | .500 | .500 | .500 | 1.000 | .333 | .500 | 1.000 | 1.000 | .667 | .333 |
| P18 | .500 | .667 | .667 | .667 | .667 | .333 | .500 | .500 | .500 | .333 | .333 | .750 | .667 | .250 | .333 | .667 | .667 | 1.000 | .667 |
| P19 | .250 | .333 | .333 | .333 | .333 | .500 | .250 | .667 | .250 | .500 | .500 | .500 | .333 | .333 | .500 | .333 | .333 | .667 | 1.000 |

Tabla 69. Historial de conglomeración de colinas kársticas residuales

| Etapa | Conglomerado que se combina | | Coeficientes | Etapa en la que el conglomerado aparece por primera vez | | Próxima etapa |
|-------|-----------------------------|-----------------|--------------|---|-----------------|---------------|
| | Conglomerad o 1 | Conglomerad o 2 | | Conglomerad o 1 | Conglomerad o 2 | |
| 1 | 16 | 17 | 1.000 | 0 | 0 | 2 |
| 2 | 2 | 16 | 1.000 | 0 | 1 | 9 |
| 3 | 11 | 15 | 1.000 | 0 | 0 | 5 |
| 4 | 5 | 13 | 1.000 | 0 | 0 | 9 |
| 5 | 6 | 11 | 1.000 | 0 | 3 | 6 |
| 6 | 6 | 10 | 1.000 | 5 | 0 | 18 |
| 7 | 7 | 9 | 1.000 | 0 | 0 | 8 |
| 8 | 1 | 7 | 1.000 | 0 | 7 | 14 |
| 9 | 2 | 5 | 1.000 | 2 | 4 | 11 |
| 10 | 3 | 4 | 1.000 | 0 | 0 | 11 |
| 11 | 2 | 3 | 1.000 | 9 | 10 | 16 |
| 12 | 12 | 18 | .750 | 0 | 0 | 15 |
| 13 | 8 | 19 | .667 | 0 | 0 | 15 |
| 14 | 1 | 14 | .667 | 8 | 0 | 16 |
| 15 | 8 | 12 | .604 | 13 | 12 | 17 |
| 16 | 1 | 2 | .583 | 14 | 11 | 17 |
| 17 | 1 | 8 | .455 | 16 | 15 | 18 |
| 18 | 1 | 6 | .428 | 17 | 6 | 0 |

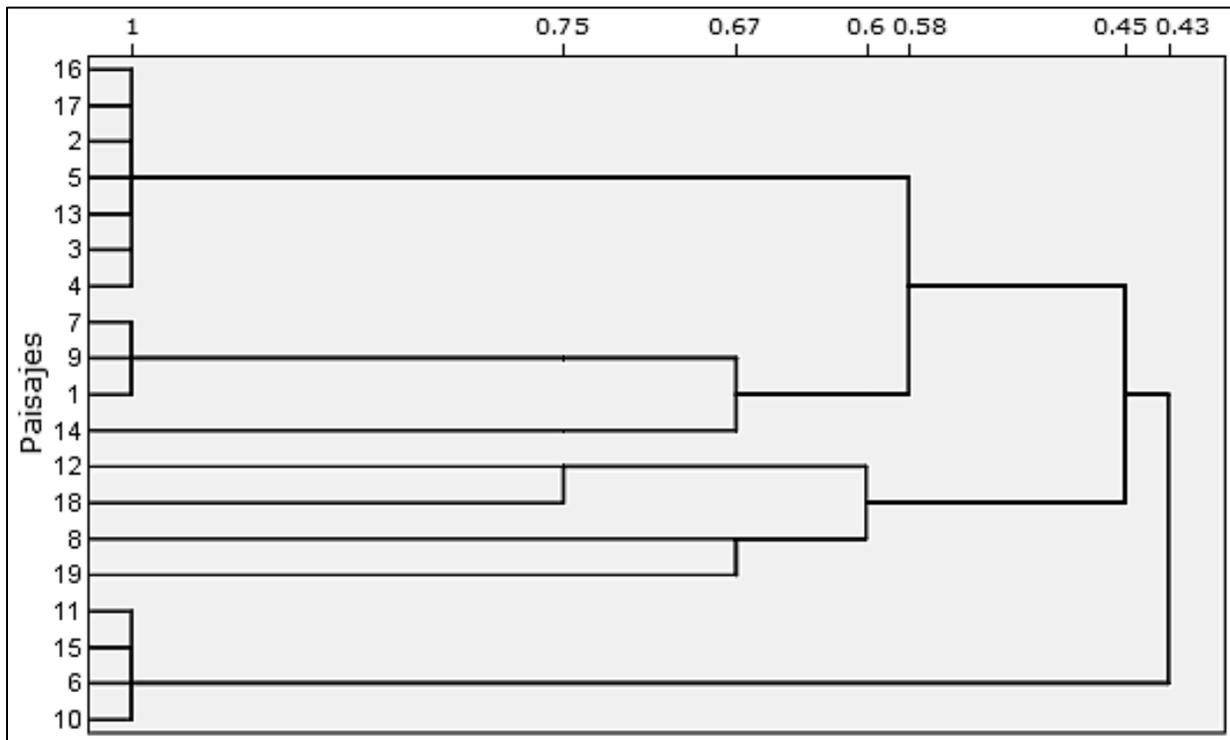
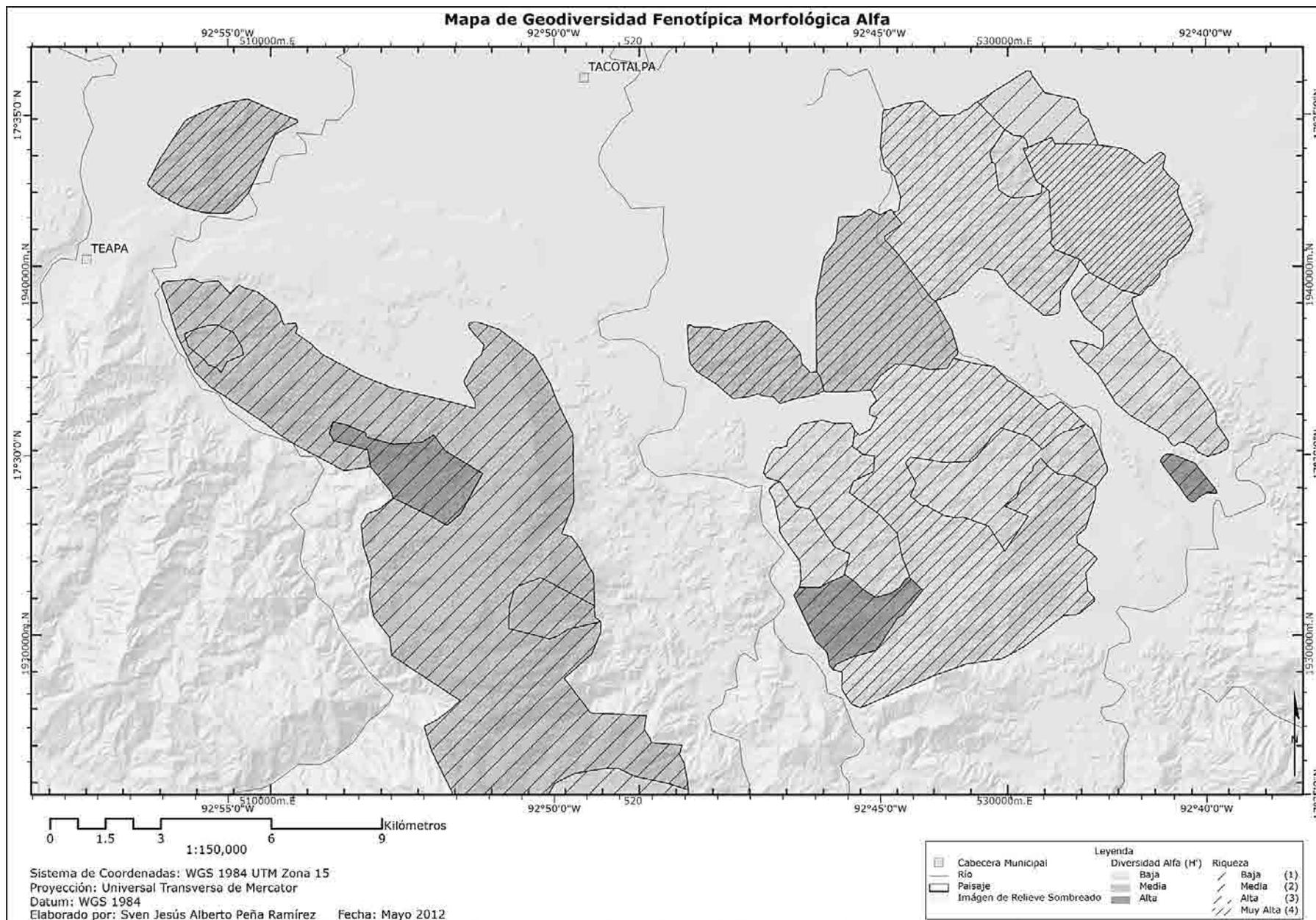
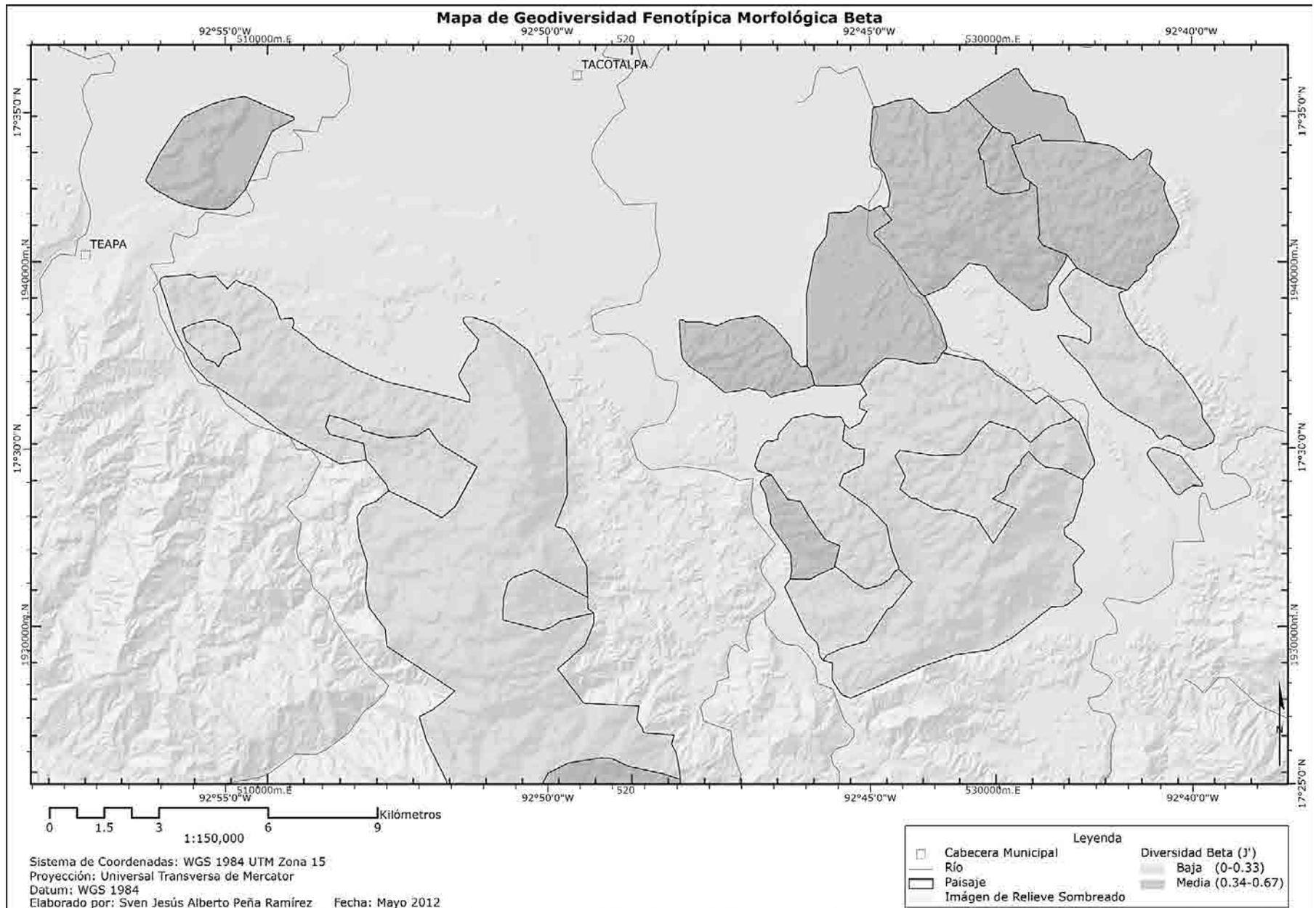


Figura 206. Dendrograma de vinculación media (entre paisajes) de colinas kársticas residuales



Mapa 31. Mapa de Geodiversidad Fenotípica Morfológica Alfa



Mapa 32. Mapa de Geodiversidad Fenotípica Morfológica Beta

4.3.3.1.2 GEODIVERSIDAD REPRESENTATIVA DE LOS PAISAJES KÁRSTICOS

4.3.3.1.2.1 GEODIVERSIDAD FUNCIONAL (INTRAGEOMORFOLÓGICA)

4.3.3.1.2.1.1 DIVERSIDAD ALFA

Considerando la determinación taxonómica del paisaje kárstico en el PEST (véase 4.1), así como el tipo de comunidad (región) que representa, i.e. funcional (intrageomorfológica) (véase 4.3.2.2), se resolvió evaluar su diversidad alfa con base en las tres categorías taxonómicas determinadas: género, tipo y subtipo (Tabla 70) (Tabla 71).

Tabla 70. Cálculos de geodiversidad alfa de paisajes geomorfológicos

| Región geomorfológica Parque Estatal de la Sierra de Tabasco | | | | | |
|---|------|-------|---------|-----------|---------------|
| Género de Paisaje | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ |
| <i>Karst laberíntico</i> | 7 | 0.37 | 0.14 | -0.99 | -0.37 |
| <i>Karst poligonal</i> | 6 | 0.31 | 0.10 | -1.17 | -0.36 |
| <i>Fluviokarst activo</i> | 4 | 0.21 | 0.04 | -1.56 | -0.33 |
| <i>Karst residual</i> | 2 | 0.10 | 0.01 | -2.30 | -0.23 |
| S=4 | A=19 | | D=0.29 | | H'=1.29 |
| lnS=1.39 | | | D'=3.45 | | E=0.93 |
| Región geomorfológica Parque Estatal de la Sierra de Tabasco | | | | | |
| Tipo de Paisaje | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ |
| <i>Karst laberíntico cónico</i> | 7 | 0.37 | 0.14 | -0.99 | -0.37 |
| <i>Karst poligonal cónico</i> | 6 | 0.31 | 0.10 | -1.17 | -0.36 |
| <i>Fluviokarst activo cónico</i> | 4 | 0.21 | 0.04 | -1.56 | -0.33 |
| <i>Karst residual cónico</i> | 2 | 0.10 | 0.01 | -2.30 | -0.23 |
| S=4 | A=19 | | D=0.29 | | H'=1.29 |
| lnS=1.39 | | | D'=3.45 | | E=0.93 |
| Región geomorfológica Parque Estatal de la Sierra de Tabasco | | | | | |
| Subtipo de Paisaje | N | p_i | p_i^2 | $\ln p_i$ | $p_i \ln p_i$ |
| <i>Karst laberíntico cónico con cúpula subdominante</i> | 1 | 0.07 | 0.00 | -2.66 | -0.19 |
| <i>Karst laberíntico cónico con cúpulas subdominantes</i> | 1 | 0.07 | 0.00 | -2.66 | -0.19 |
| <i>Karst laberíntico cónico con cúpulas y torres subdominantes</i> | 1 | 0.07 | 0.00 | -2.66 | -0.19 |
| <i>Karst laberíntico cónico con mogote subdominante</i> | 1 | 0.07 | 0.00 | -2.66 | -0.19 |
| <i>Karst laberíntico cónico con mogotes y cúpula subdominantes</i> | 1 | 0.07 | 0.00 | -2.66 | -0.19 |
| <i>Karst laberíntico cónico con mogotes y cúpulas subdominantes</i> | 1 | 0.07 | 0.00 | -2.66 | -0.19 |
| <i>Karst poligonal cónico con cúpula subdominante</i> | 1 | 0.07 | 0.00 | -2.66 | -0.19 |
| <i>Karst poligonal cónico con cúpulas subdominantes</i> | 2 | 0.13 | 0.02 | -2.04 | -0.26 |
| <i>Karst poligonal cónico con cúpulas y mogotes subdominantes</i> | 1 | 0.07 | 0.00 | -2.66 | -0.19 |
| <i>Karst poligonal cónico con cúpulas, mogote y torre subdominantes</i> | 1 | 0.07 | 0.00 | -2.66 | -0.19 |
| <i>Karst poligonal cónico con torre subdominante</i> | 1 | 0.07 | 0.00 | -2.66 | -0.19 |
| <i>Fluviokarst activo cónico con cúpula subdominante</i> | 1 | 0.07 | 0.00 | -2.66 | -0.19 |
| <i>Fluviokarst activo cónico con cúpulas subdominantes</i> | 1 | 0.07 | 0.00 | -2.66 | -0.19 |
| <i>Karst residual cónico con mogotes y torres subdominantes</i> | 1 | 0.07 | 0.00 | -2.66 | -0.19 |
| S=14 | A=15 | | D=0.02 | | H'=2.73 |
| lnS=2.64 | | | D'=50 | | E=1.03 |

Tabla 71. Geodiversidad alfa de paisajes geomorfológicos

| Categoría | S | A | H' | E | D | D' |
|-----------|----|----|------|------|------|------|
| Género | 4 | 19 | 1.29 | 0.93 | 0.29 | 3.45 |
| Tipo | 4 | 19 | 1.29 | 0.93 | 0.29 | 3.45 |
| Subtipo | 14 | 15 | 2.73 | 1.03 | 0.02 | 50 |

4.3.3.1.3 IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS PRIORITARIAS DE CONSERVACIÓN

4.3.3.1.3.1 CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS

Este trabajo se realizó conforme al esquema de aplicabilidad descrito en la **Tabla 72**, y bajo las clases y criterios de establecimiento mostrados en la **Tabla 73**.

Tabla 72. Aplicabilidad de propiedades emergentes para la identificación de áreas prioritarias de conservación

| Propiedad emergente | Procesos | CKR | Paisajes |
|--|----------|-----|----------|
| Área mínima de representatividad específica | × | × | ✓ |
| Área de mayor diversidad alfa específica | ✓ | ✓ | × |
| Área de mayor diversidad beta específica | ✓ | ✓ | × |
| Área mínima representativa de riqueza específica | × | ✓ | ✓ |
| Área de mayor riqueza específica | ✓ | ✓ | × |
| Valor de importancia de la especie <i>i</i> | × | ✓ | ✓ |

Tabla 73. Clases y criterios considerados para el establecimiento de las áreas emergentes y valores de importancia de la especie *i*

| Propiedad emergente | Procesos | CKR | Paisajes |
|--|----------|-------------------|-------------------|
| Área mínima de representatividad específica | - | - | Ajustada |
| Área de mayor diversidad alfa específica | Alta | Media y Alta | - |
| Área de mayor diversidad beta específica | Media | Media | - |
| Área mínima representativa de riqueza específica | - | Intrapaisajística | Interpaisajística |
| Área de mayor riqueza específica | Alta | Alta y Muy Alta | - |
| Valor de importancia de la especie <i>i</i> | - | Intraregional | Intraregional |

El área mínima representativa de riqueza específica, correspondiente a las colinas kársticas residuales, ha de constituir particularmente el área núcleo de riqueza específica (de colinas kársticas residuales) de cada paisaje geomorfológico. Para tal propósito y por su naturaleza puntual, se definieron los criterios considerados para la construcción del *árbol de máxima conectividad de riqueza específica*, conjuntamente con la adaptación y ajustes al método areográfico (**Tabla 74**) (Peña Ramírez, 2012).

Tabla 74. Criterios para la construcción del árbol de máxima conectividad de riqueza específica

| | | |
|-------------------------------------|--|---|
| Origen del árbol | 1. Abundancia | Tipo de colina kárstica residual menos abundante de la muestra. |
| | 2. Correspondencia proceso-geomorfológica | Colina kárstica residual correspondiente con el proceso geomorfológico dominante en el paisaje en cuestión. |
| | 3. Altura | Colina kárstica residual de mayor altura. |
| | 4. Área basal | Colina kárstica residual con mayor área basal |
| Secuencia de construcción del árbol | 1. Abundancia | Tipo de colina kárstica residual subsecuente en abundancia. |
| | 2. Cercanía y correspondencia proceso-geomorfológica | Colina kárstica residual más cercana y correspondiente con el proceso geomorfológico dominante en el paisaje en cuestión. |
| | 3. Cercanía | Colina kárstica residual más cercana |

El trazado del área de distribución sigue el método areográfico, con la diferencia de que el valor de la media aritmética de los segmentos (\bar{X}), y el de su desviación estándar (S), ambos son multiplicados por el *Índice de Aislamiento* (A') para obtener radios ajustados a la naturaleza espacial de la muestra. Dicho índice ha sido diseñado para la eliminación del error por aislamiento

(Peña Ramírez, 2012), i.e. la obtención de radios de grandes dimensiones por causa del aislamiento relativo de uno o más integrantes de la muestra.

$$A' = \frac{\text{Longitud del segmento menor} \times \text{número de segmentos}}{\text{Longitud del árbol de máxima conectividad de riqueza específica}}$$

Tanto los árboles de máxima conectividad de riqueza específica como sus áreas de distribución correspondientes, fueron trazados sobre la plataforma digital de ArcGIS 10.

Las áreas mínimas de representatividad específica, correspondientes a los paisajes geomorfológicos, fueron establecidas conforme a los ajustes descritos en la **Tabla 75**, y al principio de continuidad de polígonos, esto con el propósito de optimizar su valoración evolutiva y estética, así como su manejo espacial.

Tabla 75. Ajustes para el establecimiento de las áreas mínimas de representatividad específica

| Categoría taxonómica | Divisor | Abundancia original | Abundancia reducida |
|----------------------|---------|---------------------|---------------------|
| Género | 2 | 19 | 10 (Ajustada) |
| Tipo | 2 | 19 | 10 (Ajustada) |
| Subtipo | 1 | 15 | 15 |

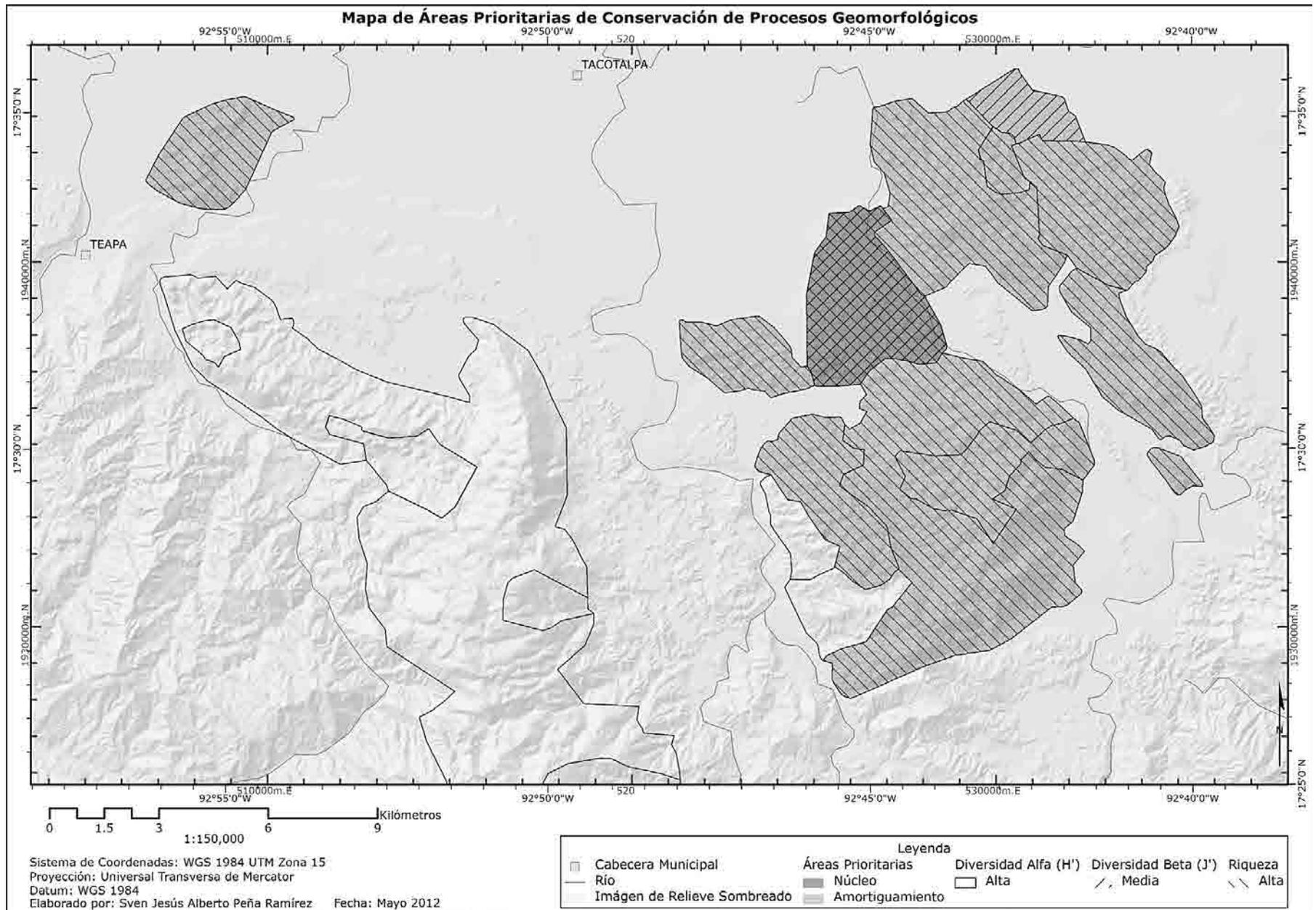
Las áreas mínimas representativas de riqueza específica, correspondientes a los paisajes geomorfológicos, fueron establecidas conforme al mismo principio de continuidad de polígonos, y con base en su calidad representativa (véase **4.1**).

En los tres casos: procesos, colinas kársticas residuales y paisajes, la identificación de áreas prioritarias de conservación se realizó con base en el principio de superposición de áreas emergentes (excluyendo el área mínima representativa de riqueza específica, correspondiente a las colinas kársticas residuales, debido a su naturaleza intrapaisajística no compatible con las demás áreas emergentes). Así, el *área núcleo* quedó definida por la máxima superposición de áreas emergentes, y el *área de amortiguamiento* por la subsecuente.

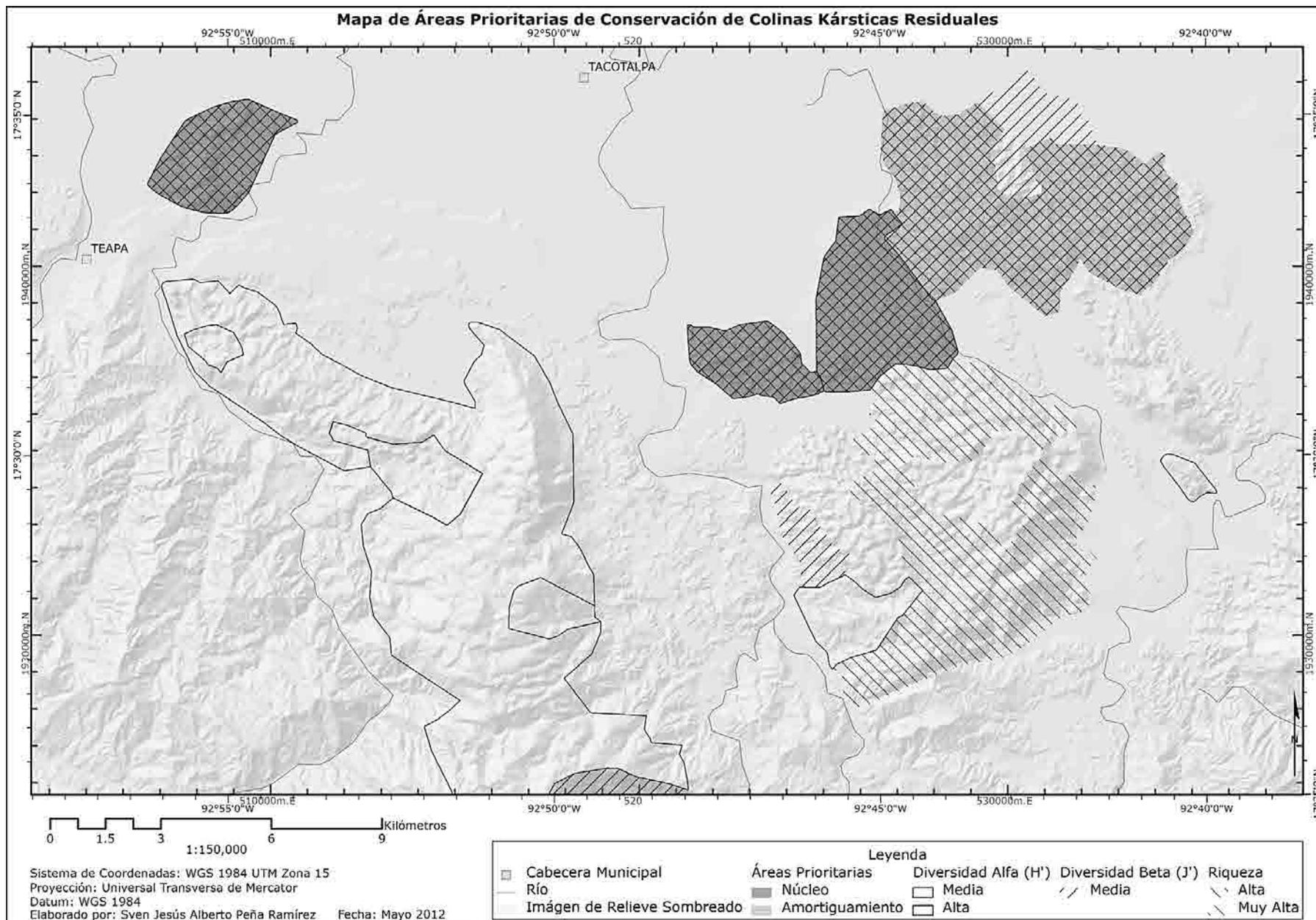
En cuanto a los valores de importancia de la especie *i*, el criterio seleccionado para el tamaño de la misma fue la altura para colinas kársticas residuales, y la cobertura para paisajes geomorfológicos. Esto por considerar la importancia evolutiva y estética de ambos criterios. La frecuencia fue calculada con base en el número de paisajes en los que se encuentra un tipo de colina kárstica residual; y el número de paisajes por género, tipo o subtipo presentes en la región, sumado al número de veces en que éstos comparten frontera con los demás paisajes de la región.

4.3.3.1.3.2 ÁREAS PRIORITARIAS DE CONSERVACIÓN DE PROCESOS GEOMORFOLÓGICOS, COLINAS KÁRSTICAS RESIDUALES Y PAISAJES GEOMORFOLÓGICOS

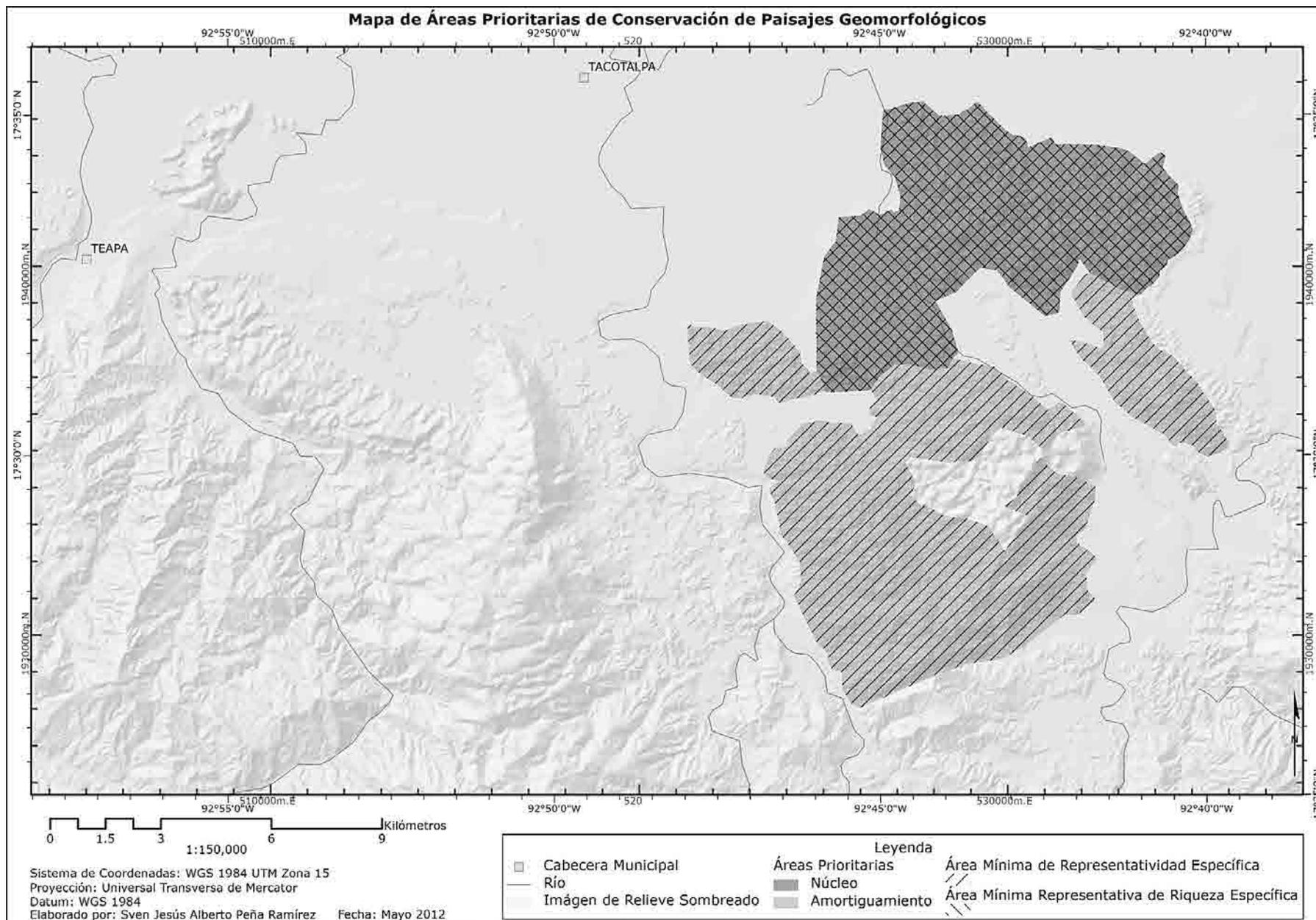
En el ámbito de las áreas prioritarias de conservación, los **Mapas 33, 34 y 35** muestran las áreas núcleo y de amortiguamiento de procesos geomorfológicos, colinas kársticas residuales y paisajes geomorfológicos, respectivamente. El **Mapa 36** describe el área núcleo de riqueza específica (de colinas kársticas residuales) de cada paisaje geomorfológico.



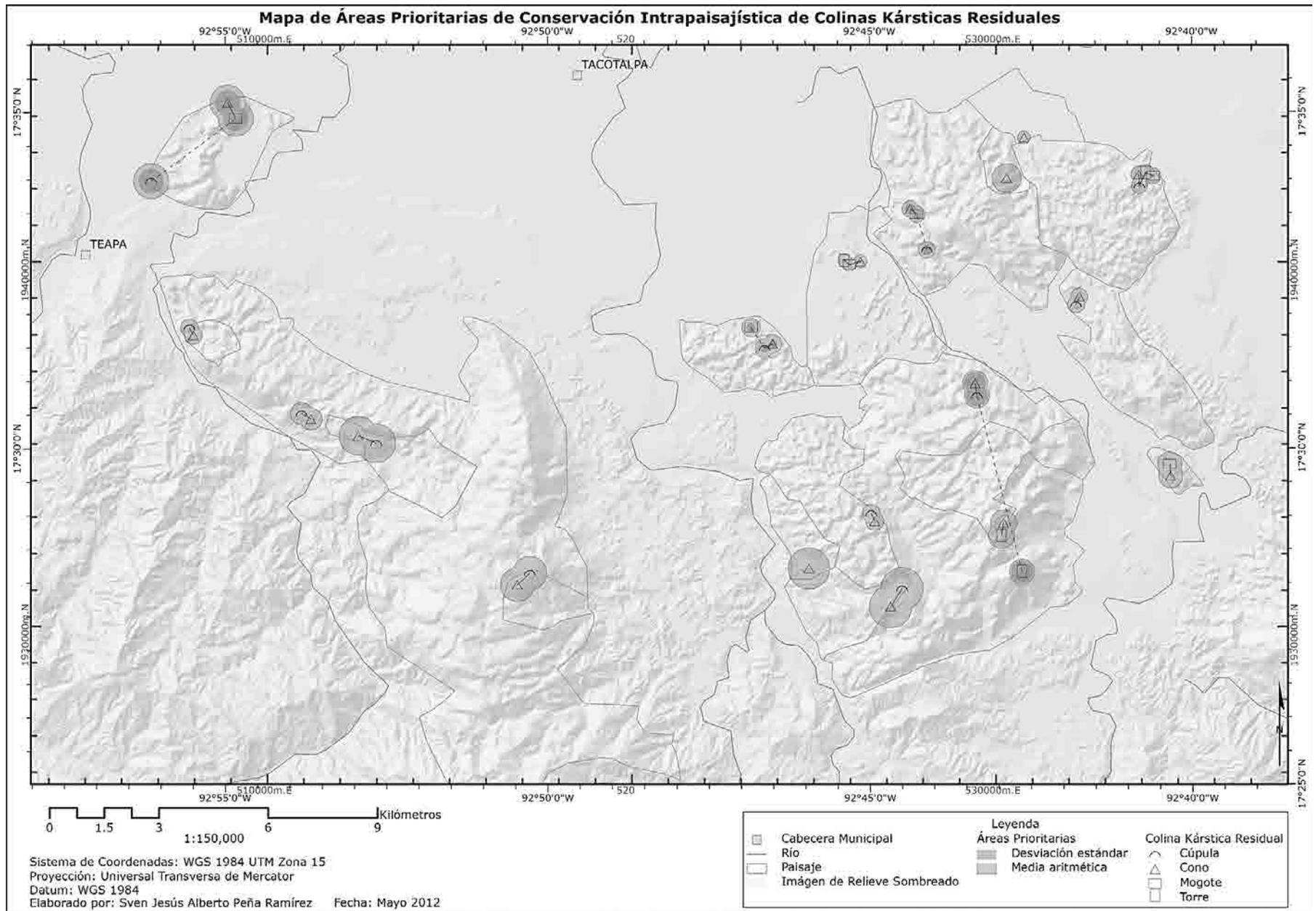
Mapa 33. Mapa de Áreas Prioritarias de Conservación de Procesos Geomorfológicos



Mapa 34. Mapa de Áreas Prioritarias de Conservación de Colinas Kársticas Residuales



Mapa 35. Mapa de Áreas Prioritarias de Conservación de Paisajes Geomorfológicos



Mapa 36. Mapa de Áreas Prioritarias de Conservación Intrapaisajística de Colinas Kársticas Residuales

4.3.3.1.3.3 VALORES DE IMPORTANCIA DE LA ESPECIE I

Los datos de referencia y valores de importancia resultantes se enlistan en la **Tabla 76**.

Tabla 76. Valores de importancia de colinas kársticas residuales y paisajes geomorfológicos

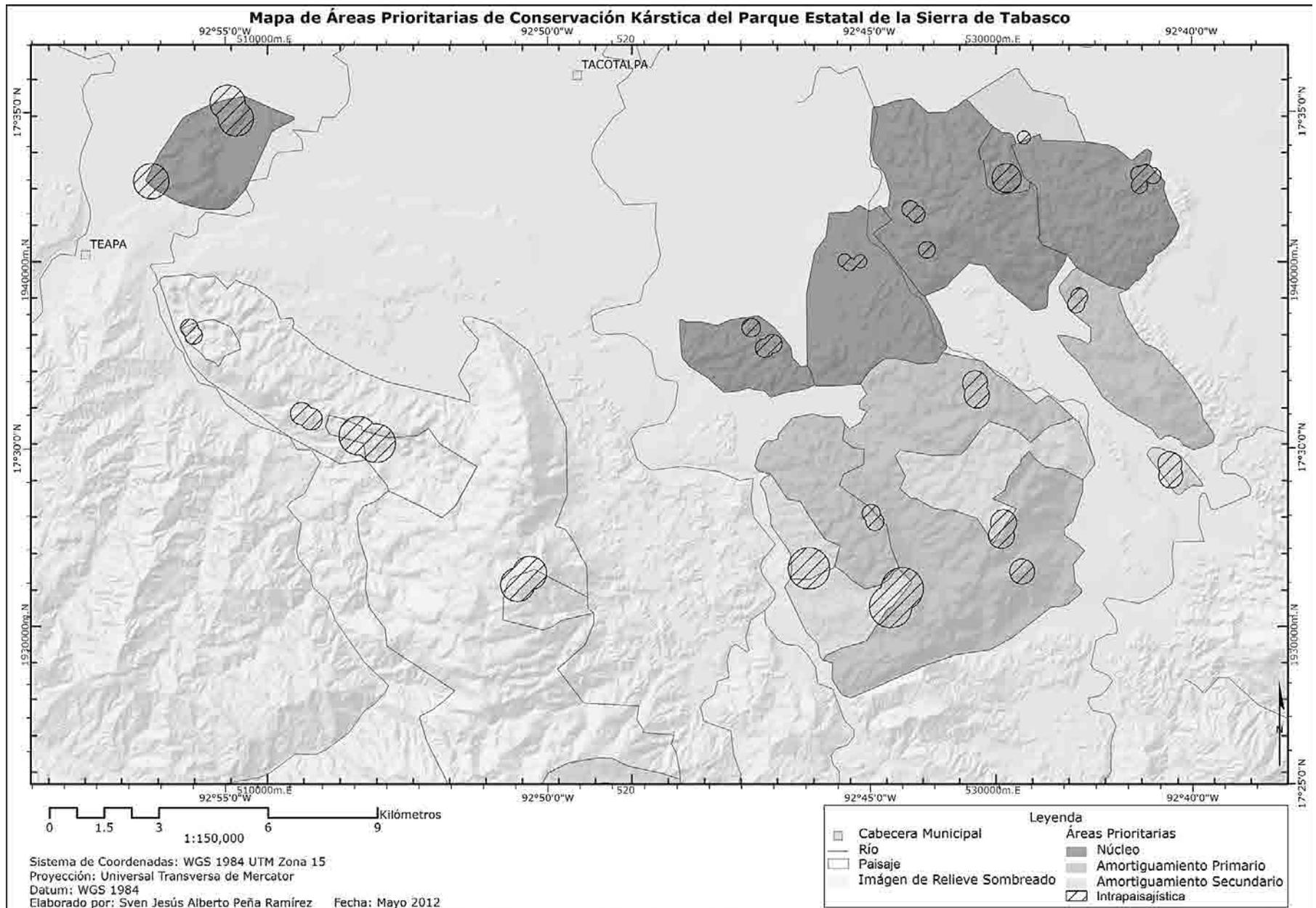
| Grupo | Especie | N | Denr | F | Fr | T (m) | Domr | Vi |
|------------------------------|---|-----|------|----|------|----------------------|------|------|
| Colinas Kársticas Residuales | Cúpula | 58 | 0.06 | 12 | 0.29 | 1050 | 0.03 | 0.38 |
| | Cono | 805 | 0.89 | 19 | 0.46 | 24110 | 0.82 | 2.17 |
| | Mogote | 25 | 0.03 | 6 | 0.15 | 2335 | 0.08 | 0.26 |
| | Torre | 14 | 0.01 | 4 | 0.10 | 2040 | 0.07 | 0.18 |
| | | 902 | | 41 | | 29535 | | |
| Grupo | Especie | N | Denr | F | Fr | T (Km ²) | Domr | Vi |
| Géneros y Tipos de paisajes | <i>Karst laberíntico cónico</i> | 7 | 0.37 | 22 | 0.37 | 142.554 | 0.67 | 1.41 |
| | <i>Karst poligonal cónico</i> | 6 | 0.31 | 17 | 0.29 | 40.723 | 0.19 | 0.79 |
| | <i>Fluviokarst activo cónico</i> | 4 | 0.21 | 12 | 0.20 | 13.291 | 0.06 | 0.47 |
| | <i>Karst residual cónico</i> | 2 | 0.10 | 8 | 0.13 | 16.193 | 0.08 | 0.31 |
| | | 19 | | 59 | | 212.761 | | |
| Grupo | Especie | N | Denr | F | Fr | T (Km ²) | Domr | Vi |
| Subtipos de paisajes | <i>Karst laberíntico cónico con cúpula subdominante</i> | 1 | 0.07 | 2 | 0.04 | 8.871 | 0.04 | 0.15 |
| | <i>Karst laberíntico cónico con cúpulas subdominantes</i> | 1 | 0.07 | 5 | 0.11 | 68.518 | 0.34 | 0.52 |
| | <i>Karst laberíntico cónico con cúpulas y torres subdominantes</i> | 1 | 0.07 | 5 | 0.11 | 35.779 | 0.18 | 0.36 |
| | <i>Karst laberíntico cónico con mogote subdominante</i> | 1 | 0.07 | 1 | 0.02 | 0.970 | 0.00 | 0.09 |
| | <i>Karst laberíntico cónico con mogotes y cúpula subdominantes</i> | 1 | 0.07 | 1 | 0.02 | 7.423 | 0.04 | 0.13 |
| | <i>Karst laberíntico cónico con mogotes y cúpulas subdominantes</i> | 1 | 0.07 | 5 | 0.11 | 18.224 | 0.09 | 0.27 |
| | <i>Karst poligonal cónico con cúpula subdominante</i> | 1 | 0.07 | 4 | 0.09 | 8.679 | 0.04 | 0.20 |
| | <i>Karst poligonal cónico con cúpulas subdominantes</i> | 2 | 0.13 | 4 | 0.09 | 6.204 | 0.03 | 0.25 |
| | <i>Karst poligonal cónico con cúpulas y mogotes subdominantes</i> | 1 | 0.07 | 2 | 0.04 | 5.549 | 0.03 | 0.14 |
| | <i>Karst poligonal cónico con cúpulas, mogote y torre subdominantes</i> | 1 | 0.07 | 5 | 0.11 | 12.347 | 0.06 | 0.24 |
| | <i>Karst poligonal cónico con torre subdominante</i> | 1 | 0.07 | 2 | 0.04 | 7.945 | 0.04 | 0.15 |
| | <i>Fluviokarst activo cónico con cúpula subdominante</i> | 1 | 0.07 | 2 | 0.04 | 2.675 | 0.01 | 0.12 |
| | <i>Fluviokarst activo cónico con cúpulas subdominantes</i> | 1 | 0.07 | 4 | 0.09 | 4.714 | 0.02 | 0.18 |
| | <i>Karst residual cónico con mogotes y torres subdominantes</i> | 1 | 0.07 | 4 | 0.09 | 12.533 | 0.06 | 0.22 |
| | | 15 | | 46 | | 200.431 | | |

4.3.3.1.3.4 ÁREAS PRIORITARIAS DE CONSERVACIÓN KÁRSTICA DEL PARQUE ESTATAL DE LA SIERRA DE TABASCO

Dicha área fue definida a partir del análisis conjunto de las áreas prioritarias de conservación de procesos geomorfológicos, colinas kársticas residuales y paisajes geomorfológicos. Considerando a éstas tres como áreas integrales de su homónima prioritaria de conservación kárstica, el área núcleo del paisaje kárstico del PEST se define por la presencia de al menos un área núcleo integral, el área de amortiguamiento, conformada por un sector primario y otro secundario, queda delimitada por la superposición de dos áreas de amortiguamiento integral y la presencia de un área de amortiguamiento integral, respectivamente (**Mapa 37**).

El tamaño en altura de los mogotes y torres, en comparación con el de las cúpulas y conos (**Tabla 76**), ponen en evidencia lo relevante de los primeros dentro del paisaje kárstico del PEST, no solo por su rareza presencial, sino también por su superioridad relativa en altura, lo que se traduce en un mayor valor evolutivo y estético para los paisajes en que figuran.

Los valores de importancia de los diferentes géneros (y tipos) de paisaje kárstico (**Tabla 76**), denotan la inferioridad en cobertura de los karsts fluviales y residuales, en comparación con los laberínticos y poligonales, lo cual corrobora y justifica la ampliación del área de amortiguamiento a dos sectores, donde el secundario contempla, precisamente, la mitad respectiva a los géneros residual y fluvial. Los valores de importancia de los diferentes subtipos de paisaje kárstico (**Tabla 76**) muestran la variabilidad morfológica (de colinas kársticas residuales) actual del paisaje kárstico del PEST, y también, en cierto modo, su variabilidad potencial.



Mapa 37. Mapa de Áreas Prioritarias de Conservación Kárstica del Parque Estatal de la Sierra de Tabasco

4.3.3.2 VALORES DE LA GEODIVERSIDAD DEL PAISAJE KÁRSTICO EN EL PARQUE ESTATAL DE LA SIERRA DE TABASCO

Los valores de la geodiversidad de los 19 paisajes geomorfológicos del PEST se muestran en la **Tabla 77** y **Mapa 38**¹²⁸, y su correspondiente regional en la **Tabla 78**.

Tabla 77. Valores de la geodiversidad de los 19 paisajes geomorfológicos del PEST

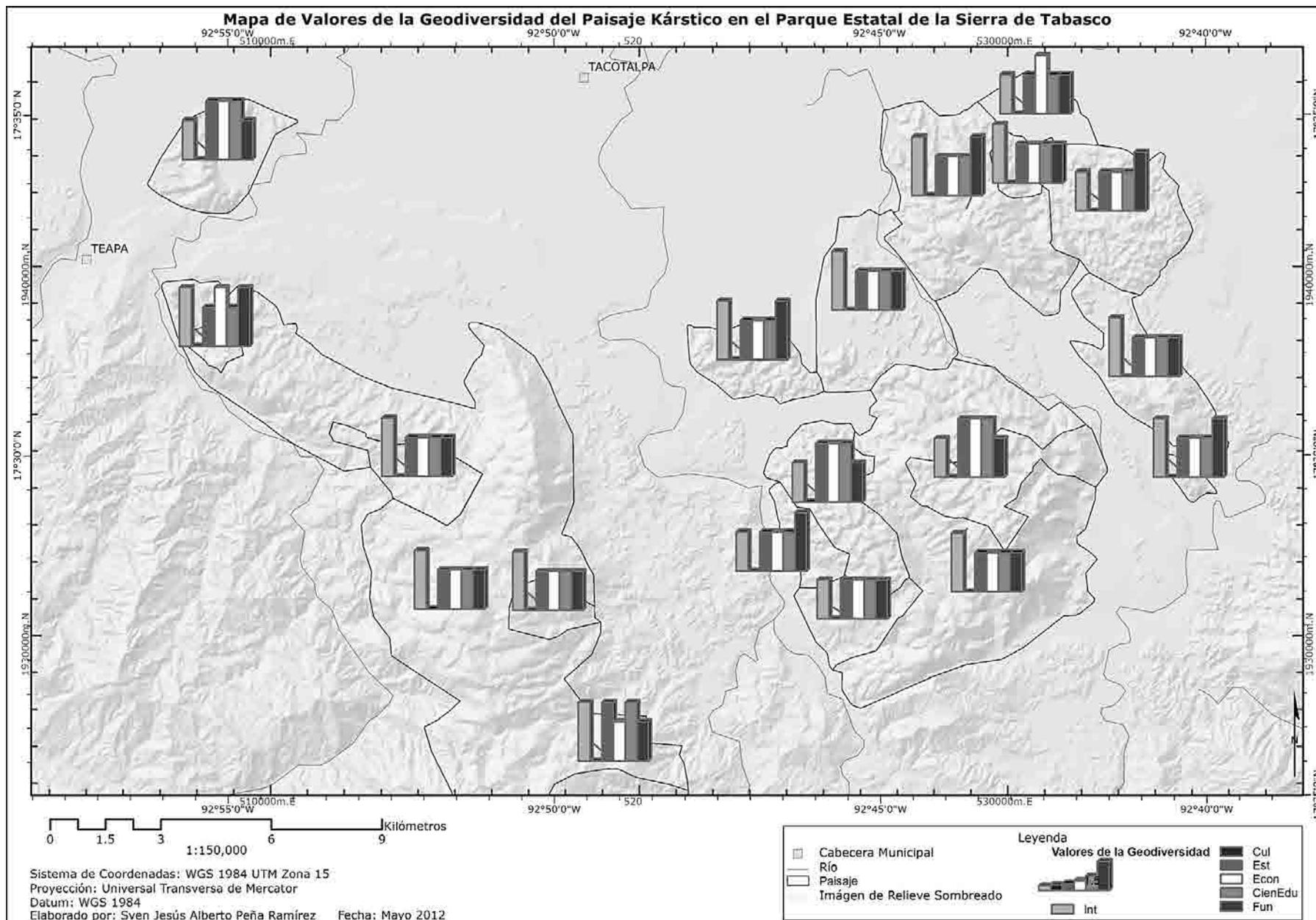
| Paisaje | Valores de la Geodiversidad | | | | | |
|---------|-----------------------------|----------|----------|-------------|------------------------|------------|
| | Intrínseco | Cultural | Estético | Económico | Científico y Educativo | Funcional |
| 1 | Medio | Ausente | Alto | Alto (AAA) | Alto (AA) | Medio (MM) |
| 2 | Alto | Ausente | Medio | Medio (MAM) | Medio (MM) | Medio (MM) |
| 3 | Alto | Ausente | Medio | Medio (MAB) | Medio (MM) | Alto (MA) |
| 4 | Medio | Ausente | Medio | Medio (MAB) | Medio (MM) | Alto (MA) |
| 5 | Alto | Ausente | Medio | Medio (MAB) | Medio (MM) | Medio (MB) |
| 6 | Alto | Ausente | Medio | Medio (MAB) | Medio (MM) | Medio (MB) |
| 7 | Alto | Ausente | Medio | Medio (MAB) | Medio (MM) | Alto (MA) |
| 8 | Medio | Ausente | Alto | Alto (AAM) | Alto (AA) | Medio (MM) |
| 9 | Alto | Ausente | Medio | Medio (MAM) | Medio (MM) | Medio (MM) |
| 10 | Medio | Ausente | Alto | Alto (AAB) | Alto (AM) | Medio (MM) |
| 11 | Alto | Ausente | Medio | Medio (MAB) | Medio (MM) | Medio (MB) |
| 12 | Alto | Ausente | Medio | Alto (AAB) | Medio (MM) | Alto (MA) |
| 13 | Alto | Ausente | Medio | Medio (MAB) | Medio (MM) | Medio (MM) |
| 14 | Alto | Ausente | Alto | Medio (MAB) | Alto (AM) | Medio (MM) |
| 15 | Alto | Ausente | Medio | Medio (MAB) | Medio (MM) | Medio (MM) |
| 16 | Medio | Ausente | Medio | Medio (MAB) | Medio (MM) | Alto (MA) |
| 17 | Medio | Ausente | Medio | Medio (MAB) | Medio (MM) | Medio (MB) |
| 18 | Medio | Ausente | Medio | Alto (AAA) | Medio (MM) | Medio (MM) |
| 19 | Alto | Ausente | Medio | Medio (MAB) | Medio (MM) | Alto (MA) |
| Bajo | 0 | - | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Medio | 7 | - | 15 | 14 | 15 | 13 |
| Alto | 12 | - | 4 | 5 | 4 | 6 |

Tabla 78. Valores de la geodiversidad del paisaje kárstico en el PEST

| Región | Valores de la Geodiversidad | | | | | |
|--------|-----------------------------|----------|----------|-----------|------------------------|-----------|
| | Intrínseco | Cultural | Estético | Económico | Científico y Educativo | Funcional |
| PEST | Alto | Ausente | Medio | Medio | Medio | Medio |

Es importante señalar que los valores culturales, económicos, científico-educativos y funcionales evaluados, al tratarse de estimaciones cualitativas basadas parcialmente en estudios y muestreos de escala regional, pueden exponer magnitudes subestimadas. Por lo mismo, y con base en la caracterización geomorfológica del PEST, dichos valores denotan un alto potencial, tanto intrínseco como extrínseco, el cual puede ser aprovechado de manera sustentable en beneficio mutuo del ecosistema y sociedad.

¹²⁸ Donde los valores se clasificaron como: 3 (Alto), 2(Medio) y 1(Bajo).



Mapa 38. Mapa de Valores de la Geodiversidad del Paisaje Kárstico en el Parque Estatal de la Sierra de Tabasco

4.4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Sumada a los análisis y discusiones correspondientes a los resultados parciales de la presente investigación, en esta sección se analizan y discuten los resultados finales, contrastándolos con los estudios precedentes relacionados directa o indirectamente con el área de estudio.

La diferenciación geomorfológica y determinación taxonómica del karst en el Parque Estatal de la Sierra de Tabasco revela la existencia de 4 géneros y 4 tipos diferentes de paisaje kárstico, distribuidos de manera no aleatoria en 19 patrones de lineamientos (**Mapa 28**). Dicha distribución parece estar estrechamente asociada con las variaciones estructurales y litológicas en las calizas (Haryono, y otros, 2004) (Gerstenhauer, 1960).

El *Karst laberíntico cónico* se localiza en el Cerro Coconá, a lo largo de la Sierra Madrigal, oeste y sureste de la Sierra Poaná, y oeste y centro de la Sierra Tapijulapa; donde calizas duras y medianamente estratificadas han sido intensamente plegadas y fracturadas. El postulado de Gerstenhauer (1960) acerca del control estructural ejercido por las líneas de intersección tectónica NW-SE y NE-SW en la orientación del fracturamiento y colinas kársticas, así como en la formación de calles kársticas, se corrobora en la orientación preferente NE-SW y NEE-SEE de los lineamientos paralelos presentes en el *Karst laberíntico* del PEST. Asimismo, las depresiones kársticas en éste género de paisaje son grandes y alargadas en función del patrón paralelo de fracturamiento. Por su estructura geológica plegada, este género de paisaje karstico encuentra su homotipo en las Montañas Estrella, Nueva Guinea (Brook, y otros, 1978).

El *Karst poligonal cónico* se localiza en manchones al noroeste y centro de la Sierra Madrigal, en el Cerro La Iglesia, este de la Sierra Poaná, oeste y este de la Sierra Madrigal; áreas donde el intenso entrecruzamiento de lineamientos denota máxima disolución superficial, en calizas duras también, pero con estratificación fina. Aunque este género de paisaje se asemeja en lo general a lo descrito por Gerstenhauer (1960), su composición mixta de colinas kársticas residuales (conos y cúpulas en su mayoría) y depresiones kársticas menos grandes y menos alargadas, en comparación con las del *Karst laberíntico*, lo asemejan particularmente al *Karst poligonal* de Papúa Nueva Guinea descrito por Williams (1972).

El *Fluviokarst activo cónico* se distribuye en las vertientes este de Sierra Madrigal, norte de Sierra Poaná y oeste de Sierra Tapijulapa; donde, contrariamente a lo afirmado por Gerstenhauer (1960), y conforme a lo planteado por Haryono y Day (2004), el sistema de captación kárstica es superado por la escorrentía torrencial a razón de la pronunciada pendiente regional, ocasionando el desarrollo superficial de patrones dendríticos, limitando al mismo tiempo el número de depresiones kársticas. El *Fluviokarst activo* del PEST encuentra su homotipo en su similar de Belice descrito por Miller (1982).

El *Karst residual cónico* se localiza entre las Sierras de Tapijulapa y Poaná, y al norte de esta última; en calizas muy duras con baja porosidad y estratificación masiva en las inmediaciones de Poaná. La mediana diversidad de colinas kársticas residuales (conos, mogotes y torres) presente en el *Karst residual cónico* Poaná corrobora la relación, postulada por Gerstenhauer (1960), de las formas corrosivas adyacentes (torres, mogotes y conos) con las planicies de corrosión y flancos de los macizos calcáreos. Es probable que la marcada dominancia cónica en el *Karst residual* de Lomas Alegres se deba a una composición litológica más suave y más porosa, como afirman Haryono y Day (2004) en el caso de su semejante en Gunung Sewu. Las depresiones kársticas en este género de paisaje son escasas, habiendo sido generalmente degradadas y consumidas por la planicie de corrosión (Haryono, y otros, 2004). La riqueza de procesos subdominantes en estos paisajes, i.e. la persistente disolución, acumulación detrítica y erosión lineal, denota, en palabras de Gerstenhauer (1960), la historia compleja de episodios de aplanamiento y acumulación como respuesta a múltiples ajustes en el nivel base. Aunque el *Karst residual cónico* de Poaná tiene cierto parecido con el de Tonkin, Vietnam como afirma Gerstenhauer (1960), es particularmente

semejante al de Punta de la Sierra en Cuba; no así el de Lomas Alegres Tercera Sección, el cual encuentra su homotipo en el *Karst residual cónico* de Gunung Sewu en Indonesia descrito por Haryono y Day (2004).

La intensa disolución kárstica en el PEST se hace patente, entre otros factores, en la agresividad disolutiva del agua de infiltración, específicamente en su acidez tanto en posición de entrada como de salida del sistema kárstico (**Tabla 20**) (**Tabla 43**).

Si bien Espinosa Pereña (1990), Salazar Conde, y otros (2004), McDonald (2007) y especialmente Gerstenhauer (1960) reconocen acertadamente la riqueza morfológica del área, identificando cuatro diferentes tipos de colinas kársticas (véase **3.3.2**), la distribución espacial y fases de desarrollo kárstico que éste último les asigna (**Figura 90**) es parcialmente errónea, sobre todo en el caso de las cúpulas y conos, ya que como él mismo sugiere, los diferentes tipos de colinas kársticas residuales se presentan en cualquier parte del área de estudio, i.e. indistintamente en fengcong (madurez) y fenglin (senectud) (**Mapa 26**).

Como acertadamente afirma Gerstenhauer (1960), una de las razones que explican la variabilidad morfológica de los karsts tropicales (como en el caso del PEST) es la presencia simultánea de etapas evolutivas de madurez (fengcong) y senectud (fenglin), configuración paisajística resultado de una compleja historia isostática, de plegamiento y fracturamiento de las calizas.

La evidencia paleokárstica expuesta por los poljes de nivel base activos y relictos, los mogotes y torres, como son las cuevas activas basales y cavidades abandonadas; así como los fósiles jurásico-cretácicos hallados en las inmediaciones de Poaná (Nerineidae y Miliolidae), confirman la variabilidad evolutiva del paisaje kárstico en el PEST, previamente reconocida por Gerstenhauer (1960), Espinoza Pereña (1990) y Aguilar (2005).

La alta diversidad alfa de paisajes y procesos geomorfológicos evaluada, corrobora, desde la teoría karstológica contemporánea y la nueva teoría de la geodiversidad (Peña Ramírez, 2012), el "tesoro" kárstico presente en el área de estudio (PEST) sugerido por Gerstenhauer (1960). La mediana diversidad beta de procesos geomorfológicos, representada por los karsts residuales, así como el valor de importancia de éstos últimos, expone la rareza de los mismos dentro del PEST. La correspondiente diversidad de colinas kársticas residuales manifiesta la gran influencia que dichos karsts ejercen en la variabilidad morfoevolutiva del paisaje. La diversidad gamma de procesos geomorfológicos denota la gran riqueza de los mismos presente en toda el área de estudio. La dominancia cónica en el paisaje kárstico del PEST es corroborada cuantitativamente por el bajo valor en la gamma diversidad de colinas kársticas residuales, y el variable valor en la diversidad alfa de las mismas. El valor de importancia de los mogotes y torres, en comparación con el de las cúpulas y conos, pone en evidencia la superioridad relativa en altura de los primeros, y en consecuencia, su alto valor evolutivo y estético.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

El polígono que define conforme a decreto el Parque Estatal de la Sierra de Tabasco presenta inconsistencias en cuanto a cobertura del área natural de la región (**Mapa 1**). Esto hace meritorio la actualización del polígono a partir de criterios biológicos y geológicos, para así asegurar la cobertura total del ecosistema natural.

La revisión íntegra de la teoría geomorfológica-kárstica internacional, desde sus orígenes, consensos teórico-conceptuales y aportes más recientes, posibilitó su comprensión, crítica y discusión profunda, mismas que derivaron en la selección y estandarización del sistema de clasificación del paisaje kárstico (**3.3.1.6**). Lo que posteriormente permitió establecer la determinación taxonómica correspondiente (**4.1**).

La información provista por un modelo digital de elevación de alta resolución espacial (e imágenes de relieve sombreado asociadas) sumada a la derivada de las ortofotos digitales, puede incrementar significativamente la precisión con la que se interpreta el relieve. Las variaciones en el azimut de iluminación y resalte de las imágenes de relieve sombreado basadas en MDEs han demostrado ser de gran utilidad en el reconocimiento de características geológicas, tales como los lineamientos de valle. Este método, integrado formalmente en la extracción automática de lineamientos (Abdullah, y otros, 2010), corrobora y potencializa los resultados del método tradicional de extracción por interpretación visual.

El análisis de lineamientos y reconocimiento de patrones de fracturamiento hicieron posible la diferenciación geomorfológica y subdivisión espacial del paisaje kárstico. Donde su corroboración y consolidación cuantitativa y espacial a través del análisis de frecuencias de orientación, densidad, drenaje superficial y dispersión estadística, demostró ser suficientemente contundente. La inexistencia de correlación perceptible entre la orientación y longitud de los lineamientos del PEST, habla de que muy probablemente haya más variables inmiscuidas en su arreglo geométrico, lo que recuerda la poligénesis del paisaje kárstico en el PEST (**3.3.3**).

Complementariamente al análisis de lineamientos, el de caracteres espaciales (densidad, tipo evolutivo y orden de escurrimiento) y morfométricos (longitud de los ejes mayor y menor, pendiente, aspecto geomorfológico, altura y anchura) de depresiones kársticas y colinas kársticas residuales, manifestó ser sumamente útil en la caracterización y discriminación espacial de los distintos paisajes kársticos (**3.3.4** y **3.3.5**). El diseño y estandarización de la taxonomía y clave de determinación de colinas kársticas residuales de las zonas tropicales, junto con el sistema de clasificación de la escuela karstológica tradicional (Ford D., Williams P. y White W.) e indonesio-norteamericana (Day M. y Haryono E.), demostró reducir las inconsistencias teóricas en la clasificación del paisaje kárstico tropical y llevar la misma a un estándar de aplicación general, sujeto de comparación interregional (**3.3.5**).

El muestreo, verificación y observación controlada del paisaje kárstico manifestó su importancia útil en la corroboración, retroalimentación, actualización, contraste y ajuste del trabajo previo de gabinete derivado de información documental y percepción remota (**3.3.6**). La calificación y caracterización cuantitativa del muestreo litológico realizado en el PEST, fue posible gracias a las pruebas experimentales en campo así como a los análisis de laboratorio, donde la determinación de dureza Schmidt demostró ser una prueba muy útil en la caracterización litológica, y especialmente en su diferenciación detallada (**3.3.7**). Por su parte, el análisis y determinación del contenido fósil aportó valiosa información para la caracterización del ambiente de depósito (de plataforma y mares someros de terrigenos) que dio origen al banco calcáreo en cuestión (**3.3.7**).



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

La variación general en la morfología del paisaje del PEST, y en la forma de las colinas kársticas residuales, ha sido reconocida previamente (Gerstenhauer, 1960) (Espinosa Pereña, 1990) (Salazar Conde, y otros, 2004) (McDonald, 2007), sin embargo, ésta no fue examinada en detalle. Su estudio bajo el contexto teórico-práctico de la geomorfología kárstica tropical contemporánea permitió caracterizar geomorfológicamente el paisaje kárstico en el PEST, i.e. reconocer los factores de desarrollo kárstico (estructura, litología e hidrología) que actúan en cada paisaje, y por tanto los procesos geomorfológicos dominantes y subdominantes, entre otros caracteres. A su vez, su contextualización dentro del sistema de clasificación kárstica tropical (**3.3.1.6**) posibilitó su determinación taxonómica bajo un enfoque genético, morfológico y evolutivo (Peña Ramírez, 2012) (**Mapa 28**). En este estudio detallado del área kárstica del PEST y zona de influencia, se distinguieron 4 géneros de paisaje kárstico: *Karst laberíntico*, *Karst poligonal*, *Fluviokarst activo* y *Karst residual*, distribuidos en 19 patrones de lineamientos; y 4 tipos de colinas kársticas residuales (Cúpula, Cono, Mogote, Torre) con distribución variable.

En esta investigación, como en otros estudios en karst tropical (Gerstenhauer, 1960) (Haryono, y otros, 2004) (Lehmann, (1936) 1988) (Monroe, (1968) 2007) (Panos, y otros, (1968) 2007) (Sunartadirdja, y otros, (1960) 1978) (Waltham, 2008) (Williams, 1972), es evidente el papel que juega la heterogeneidad litológica, estructural y evolutiva en el modelado del paisaje kárstico, donde el relieve de mayor pendiente y altitud se desarrolla en las calizas con estratificación masiva y de mayor dureza, y los patrones de lineamientos paralelos, entrecruzados, dendríticos y aislados i.e. karsts laberínticos, poligonales, fluviales y residuales, están controlados por la dominancia proceso-geomorfológica de la erosión lineal, disolución generalizada, erosión fluvial y aplanamiento por corrosión, respectivamente. El control geológico del paisaje kárstico en el PEST es corroborado también por la orientación preferente de los lineamientos de valle NE-SW y NW-SE, congruente con los desplazamientos laterales izquierdos asociados al sistema Polochic-Motahua de edad Mioceno-Plioceno, y con las cabalgaduras, anticlinales y sinclinales del Cretácico tardío. En particular, y acorde con la conclusión de Haryono y Day (2004), referente a la influencia de la pendiente regional en el desarrollo del paisaje kárstico y geoformas kársticas individuales, los fluviokarsts activos del PEST y colinas kársticas residuales asociadas son producto de una genuina erosión fluvial, motivada en gran medida por las lluvias torrenciales y la considerable pendiente regional, proceso geomorfológico que ha favorecido el desarrollo de valles fluviales más que el de depresiones cerradas.

La evaluación de la geodiversidad, considerando sus diferentes niveles de organización (procesos, paisajes y regiones), y desde un enfoque esencial (genético y fisonómico) y representativo (sistémico y funcional), manifestó, desde la teoría karstológica contemporánea, la ecología del paisaje y la nueva teoría de la geodiversidad (Peña Ramírez, 2012), una alta eficiencia en la sistematización y estandarización de los resultados. Lo que implica una adecuada compatibilidad con la teoría de la bioconservación, además de su aplicabilidad exclusiva en los programas y figuras de geoconservación.

La alta geodiversidad genotípica sistémica alfa, genotípica sistémica gamma, y funcional alfa de paisajes geomorfológicos, demuestran genética, evolutiva y morfológicamente la gran importancia que, como patrimonio geológico mundial, tiene el paisaje kárstico del PEST. La rareza de los karsts residuales de la región, puesta en evidencia por su bajo valor de importancia así como por la mediana geodiversidad genotípica sistémica beta de paisajes geomorfológicos, junto con la mediana geodiversidad fenotípica morfológica alfa (de colinas kársticas residuales) del *Karst residual* Poaná, permitieron identificar y orientar las áreas prioritarias de conservación kárstica en el PEST (**Mapa 37**), donde el área núcleo considera los karsts laberínticos cónicos Coconá y Sierra Poaná Oeste, los karsts poligonales cónicos Cerro La Iglesia y Sierra Poaná Este, el fluviokarst activo cónico Arroyo Sierra Poaná, y el karst residual cónico Poaná. A pesar de la dominancia cónica en las colinas kársticas residuales de la región, el análisis morfométrico de las mismas y sus valores de importancia, ponen en evidencia la superioridad relativa en altura de los mogotes y torres en comparación con las cúpulas y conos, hecho que manifiesta el alto valor

evolutivo y estético de las primeras. Conjuntamente, la geodiversidad esencial genotípica y fenotípica, y representativa funcional evaluadas, ponen en evidencia la gran calidad escénica del paisaje kárstico en el PEST.

Finalmente, la considerable magnitud de los valores de la geodiversidad del paisaje kárstico en el PEST, y su alta potencialidad, describen desde la perspectiva natural y social la sólida base geográfica del PEST, para la exitosa conservación y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales propios del karst tropical.

5.2 RECOMENDACIONES

De acuerdo con los resultados y conclusiones de la presente investigación, se considera que el paisaje kárstico del Parque Estatal de la Sierra de Tabasco, incluyendo su contexto geográfico, es candidato idóneo a geoconservación kárstica y aprovechamiento sustentable de recursos naturales asociados. De manera que, independientemente de su consideración dentro de la Reserva Ecológica que representa el PEST, es meritorio y necesario su integración a programas y figuras específicas de conservación kárstica, las cuales al mismo tiempo que aseguren la integridad del patrimonio geológico, guíen los planes de manejo y prácticas de aprovechamiento sustentable del recurso karst y recursos naturales asociados, en beneficio mutuo de la naturaleza y sociedad. En ese sentido se hacen las siguientes recomendaciones:

5.2.1 PROGRAMAS DE GEOCONSERVACIÓN

1. Gestionar la integración de las áreas prioritarias de conservación kárstica del PEST (núcleo, amortiguamiento primario y secundario) (**Mapa 37**) a la lista del *Patrimonio Mundial de Paisajes y Cuevas Kársticas* de la Convención del Patrimonio Mundial (World Natural Heritage), Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN), UNESCO. O como opción secundaria se recomienda la integración únicamente del área núcleo, asumiendo que se trata de una protección parcial de la totalidad del área prioritaria de conservación kárstica.

Dicha área cumple en gran medida con las características requeridas para obtener dicho reconocimiento: procesos, paisajes y cuevas kársticas de importancia excepcional y universal en relación con las Ciencias de la Tierra, accesibilidad limitada, y considerable comprensión por parte de la sociedad civil. En cuanto a su consideración tentativa, ésta cumple con la duplicación nula (1), reconocimiento (en proceso) (2), potencial para llenar los vacíos en la lista actual (3), y estatus geoparque (parcialmente)¹²⁹ (4). A su vez, dicha área satisface los siguientes criterios: (vii) área de excepcional belleza natural e importancia estética, (viii) ejemplo representativo de las grandes etapas de la historia de la Tierra, registro fósil, importancia en los procesos geológicos en curso en el desarrollo de las formas terrestres, importantes características geomorfológicas, y (ix) ejemplo representativo en el curso de los procesos ecológicos y biológicos en la evolución y desarrollo de los ecosistemas terrestres, dulceacuícolas, y las comunidades de plantas y animales.

5.2.2 FIGURAS DE GEOCONSERVACIÓN

1. Gestionar la asignación de la categoría III *Monumento Natural* de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN), UNESCO, a las áreas prioritarias de conservación kárstica del PEST (núcleo, amortiguamiento primario y secundario) (**Mapa 37**) (**Mapa 40**). En su defecto se recomienda la asignación de la categoría nacional (CONANP) o regional correspondiente (como en el caso del Monumento Natural Gruta del Cerro Coconá). Como segunda opción se recomienda la asignación de la misma categoría solo al área núcleo,

¹²⁹ Si bien la categoría actual de protección del paisaje kárstico en el PEST (Reserva Ecológica) constituye un reconocimiento regional y nacional aceptable, ésta no es la vía más apropiada para su conservación y aprovechamiento sustentable, como en el caso del Monumento Natural Gruta del Cerro Coconá.

asumiendo que se trata de una protección parcial de la totalidad del área prioritaria de conservación kárstica (**Mapa 37**).

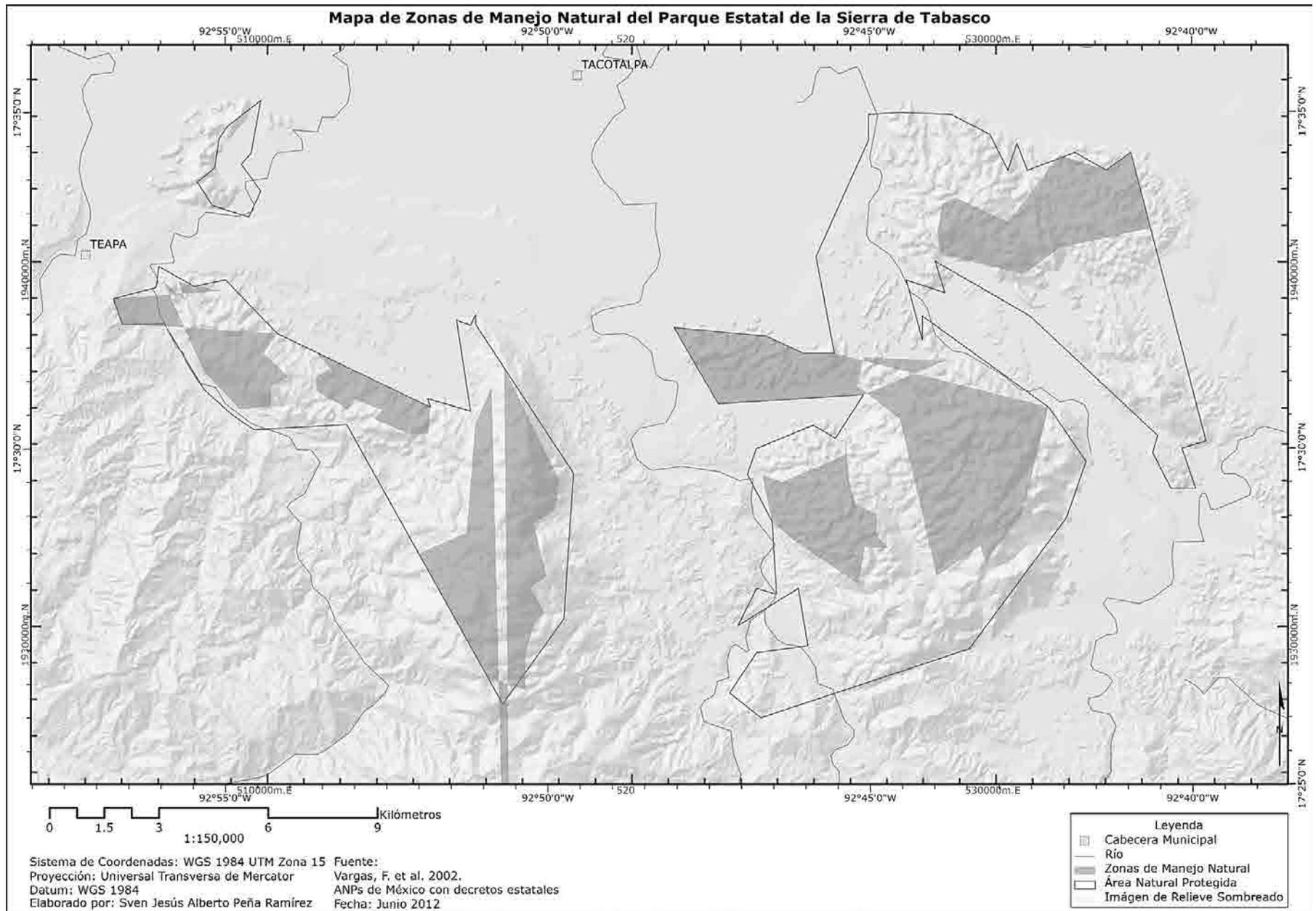
En esta figura de geoconservación el monumento natural a proteger es el paisaje kárstico en su conjunto, incluyendo sus caracteres genéticos, evolutivos y morfológicos, así como su contexto biológico y cultural. Se recomienda que esta área natural protegida lleve el nombre de *Monumento Natural Paisajes y Grutas Kársticas de la Sierra de Tabasco* (Peña Ramírez, 2012).

2. Hacer las diligencias conducentes al logro del establecimiento de un *Geoparque* dentro del área prioritaria núcleo de conservación kárstica del PEST *Karst residual cónico* Poaná (**Mapa 37**), considerando la protección total del área prioritaria de conservación intrapaisajística de colinas kársticas residuales (**Mapa 37**) (**Mapa 40**). Esto tomando en cuenta la peculiaridad evolutiva de dicha área, su notable riqueza y diversidad de colinas kársticas residuales, además de su gran potencial ecoturístico como promotor de la ruta Tacotalpa-Xicotécatl. Como un programa piloto dual de protección y aprovechamiento sustentable del karst y recursos asociados, y con la posibilidad de ampliación hacia las áreas protegidas anexas. Se recomienda que esta área natural protegida lleve el nombre de *Geoparque Poaná* (Peña Ramírez, 2012).

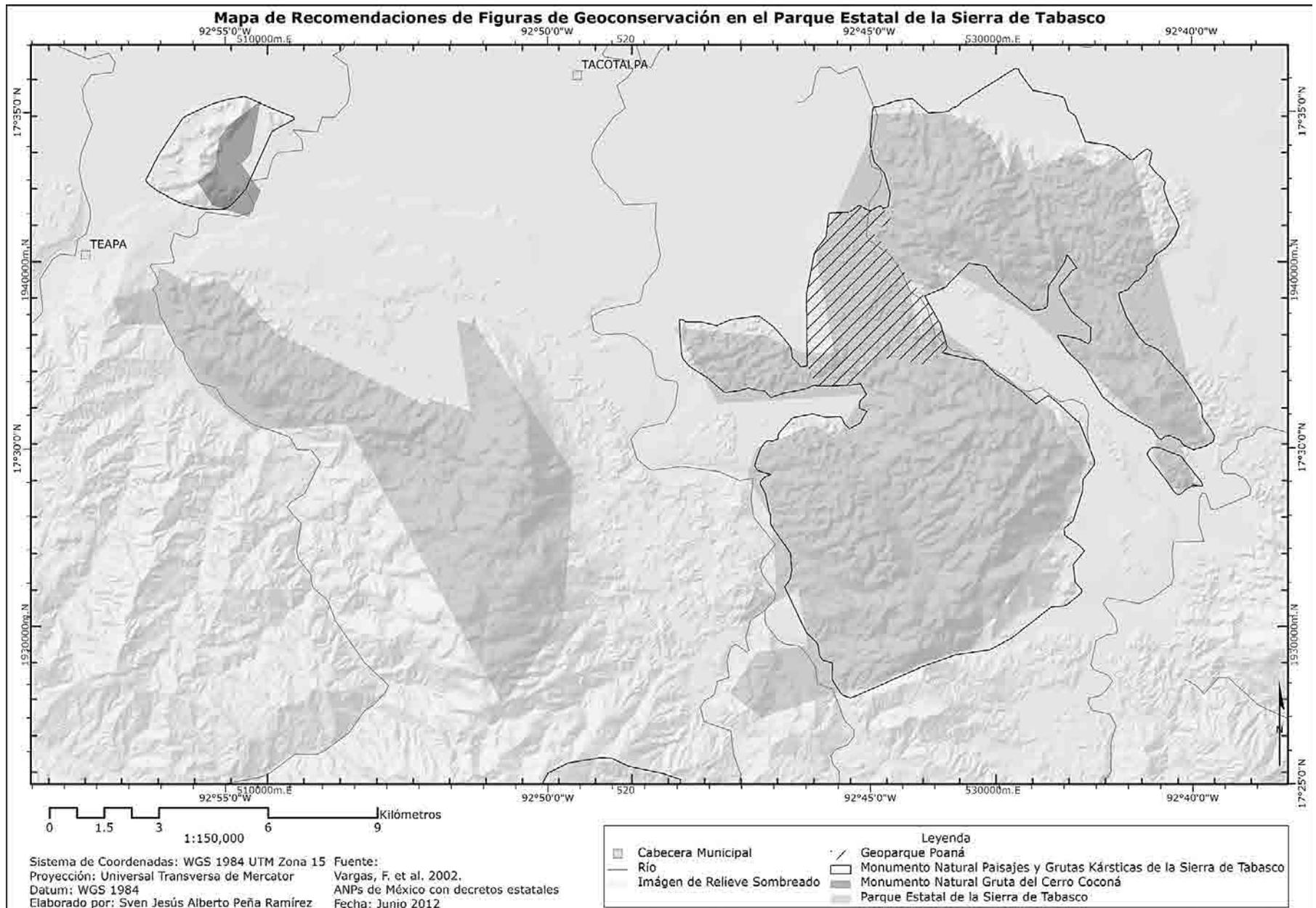
Como una consideración final hay que subrayar que el *Parque Estatal de la Sierra de Tabasco* fue designado en gran medida por su biodiversidad, significancia hidrológica, atractivo para el esparcimiento, educación e investigación, motivo de preservación y reforestación, y formaciones geomorfológicas únicas y de gran belleza escénica. En contraste, el *Monumento Natural Paisajes y Grutas Kársticas de la Sierra de Tabasco* y el *Geoparque Poaná* han de ser designados para la conservación del paisaje kárstico en su conjunto, por sus características geomorfológicas, composición y valores de geodiversidad. En ese sentido, dichas figuras de geoconservación aseguran la protección de las áreas prioritarias núcleo de conservación kárstica del PEST, consideradas en su mayoría como áreas de amortiguamiento o de uso no natural desde la perspectiva del PEST (**Mapa 39**)¹³⁰ y el Modelo de Ordenamiento Ecológico del Estado de Tabasco (Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente, 2006) (**Figura 7**); abriendo la posibilidad de aprovechar de manera sustentable la belleza escénica y alto potencial turístico de las áreas kársticas mencionadas. Aprovechando, en particular, la bondad ecoturística natural de los karsts residuales.

Así, tomando en cuenta las recomendaciones expuestas, las figuras de geoconservación en el PEST se mostrarían como en el **Mapa 40**. Como puede observarse, los límites de las ANPs no coinciden debido a que éstos fueron trazados con base en diferentes criterios, tales como: biodiversidad, ecosistemas, uso de suelo, desarrollo rural, atractivos turísticos y culturales, y ahora también geodiversidad. Ello hace prioritariamente meritorio la actualización del polígono del *Parque Estatal de la Sierra de Tabasco* (y subáreas de uso específico) para hacerlo geográficamente compatible con el *Monumento Natural Paisajes y Grutas Kársticas de la Sierra de Tabasco* (y subáreas de uso específico). Dicha gestión, sumada a la actualización y elaboración de los planes de manejo correspondientes, a reserva del establecimiento de áreas de bioconservación específica, muy probablemente asegurará la protección, conservación y aprovechamiento sustentable del patrimonio natural (geológico y biológico) y cultural de la región.

¹³⁰ Nótese la inconsistencia de los polígonos en cuestión, probablemente debida a errores cartográficos o de captura de coordenadas.



Mapa 39. Mapa de Zonas de Manejo Natural del Parque Estatal de la Sierra de Tabasco



Mapa 40. Mapa de Recomendaciones de Figuras de Geoconservación en el Parque Estatal de la Sierra de Tabasco

6. APÉNDICES

Apéndice 1. Caracteres Morfométricos y Espaciales de las Depresiones Kársticas en el Parque Estatal de la Sierra de Tabasco

| ID | Tipo Evolutivo de Depresión Kárstica | Orden de escurrimiento | Largo (m) | Ancho (m) |
|----|--------------------------------------|------------------------|-----------|-----------|
| 1 | Dolina | 2 | 233 | 47 |
| 2 | Dolina | 2 | 133 | 81 |
| 3 | Dolina | 1 | 104 | 43 |
| 4 | Dolina | 1 | 51 | 27 |
| 5 | Dolina | 1 | 76 | 44 |
| 6 | Dolina | 1 | 321 | 153 |
| 7 | Dolina | 1 | 159 | 81 |
| 8 | Dolina | 1 | 155 | 87 |
| 9 | Dolina | 1 | 25 | 15 |
| 10 | Dolina | 2 | 175 | 88 |
| 11 | Dolina | 1 | 116 | 78 |
| 12 | Dolina | 1 | 53 | 38 |
| 13 | Dolina | 3 | 203 | 65 |
| 14 | Dolina | 2 | 239 | 108 |
| 15 | Dolina | 1 | 136 | 36 |
| 16 | Dolina | 1 | 68 | 46 |
| 17 | Dolina | 1 | 50 | 32 |
| 18 | Dolina | 2 | 118 | 69 |
| 19 | Dolina | 2 | 273 | 120 |
| 20 | Dolina | 2 | 308 | 136 |
| 21 | Dolina | 1 | 218 | 82 |
| 22 | Dolina | 2 | 159 | 35 |
| 23 | Dolina | 1 | 34 | 27 |
| 24 | Dolina | 3 | 258 | 156 |
| 25 | Dolina | 2 | 64 | 19 |
| 26 | Dolina | 3 | 611 | 138 |
| 27 | Dolina | 1 | 204 | 60 |
| 28 | Dolina | 2 | 66 | 48 |
| 29 | Dolina | 2 | 229 | 134 |
| 30 | Dolina | 2 | 93 | 34 |
| 31 | Dolina | 2 | 74 | 52 |
| 32 | Dolina | 2 | 230 | 67 |
| 33 | Dolina | 2 | 294 | 53 |
| 34 | Dolina | 2 | 218 | 98 |
| 35 | Dolina | 2 | 198 | 105 |
| 36 | Dolina | 2 | 80 | 40 |
| 37 | Dolina | 2 | 476 | 191 |
| 38 | Dolina | 1 | 264 | 62 |
| 39 | Dolina | 2 | 171 | 37 |
| 40 | Dolina | 1 | 74 | 37 |



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

| ID | Tipo Evolutivo de Depresión Kárstica | Orden de escurrimiento | Largo (m) | Ancho (m) |
|----|--------------------------------------|------------------------|-----------|-----------|
| 41 | Dolina | 2 | 288 | 104 |
| 42 | Dolina | 3 | 236 | 114 |
| 43 | Dolina | 2 | 162 | 88 |
| 44 | Dolina | 1 | 113 | 46 |
| 45 | Dolina | 2 | 195 | 81 |
| 46 | Dolina | 1 | 101 | 30 |
| 47 | Dolina | 1 | 164 | 44 |
| 48 | Dolina | 2 | 142 | 49 |
| 49 | Dolina | 2 | 74 | 30 |
| 50 | Dolina | 3 | 394 | 177 |
| 51 | Dolina | 0 | 29 | 24 |
| 52 | Dolina | 2 | 83 | 20 |
| 53 | Dolina | 1 | 218 | 29 |
| 54 | Dolina | 0 | 33 | 18 |
| 55 | Dolina | 2 | 79 | 20 |
| 56 | Dolina | 2 | 423 | 34 |
| 57 | Dolina | 3 | 402 | 76 |
| 58 | Dolina | 2 | 41 | 19 |
| 59 | Dolina | 1 | 76 | 44 |
| 60 | Dolina | 2 | 161 | 127 |
| 61 | Dolina | 2 | 262 | 95 |
| 62 | Dolina | 2 | 131 | 36 |
| 63 | Dolina | 2 | 197 | 87 |
| 64 | Dolina | 2 | 126 | 69 |
| 65 | Dolina | 2 | 225 | 88 |
| 66 | Polje de nivel base relictos | 3 | 2194 | 187 |
| 67 | Dolina | 1 | 45 | 23 |
| 68 | Dolina | 1 | 45 | 25 |
| 69 | Dolina | 2 | 206 | 49 |
| 70 | Dolina | 2 | 184 | 34 |
| 71 | Dolina | 1 | 30 | 17 |
| 72 | Dolina | 2 | 101 | 36 |
| 73 | Dolina | 2 | 159 | 44 |
| 74 | Dolina | 2 | 257 | 171 |
| 75 | Dolina | 0 | 70 | 50 |
| 76 | Dolina | 2 | 321 | 94 |
| 77 | Dolina | 0 | 93 | 21 |
| 78 | Dolina | 1 | 173 | 33 |
| 79 | Dolina | 2 | 79 | 27 |
| 80 | Dolina | 2 | 130 | 78 |
| 81 | Dolina | 2 | 136 | 46 |
| 82 | Dolina | 1 | 211 | 30 |
| 83 | Dolina | 1 | 206 | 122 |

| ID | Tipo Evolutivo de Depresión Kárstica | Orden de escurrimiento | Largo (m) | Ancho (m) |
|-----|--------------------------------------|------------------------|-----------|-----------|
| 84 | Dolina | 1 | 179 | 88 |
| 85 | Dolina | 1 | 39 | 25 |
| 86 | Dolina | 1 | 83 | 33 |
| 87 | Dolina | 1 | 168 | 62 |
| 88 | Dolina | 2 | 174 | 48 |
| 89 | Dolina | 1 | 154 | 51 |
| 90 | Dolina | 1 | 67 | 12 |
| 91 | Dolina | 2 | 242 | 135 |
| 92 | Dolina | 1 | 162 | 43 |
| 93 | Dolina | 0 | 37 | 24 |
| 94 | Dolina | 2 | 105 | 50 |
| 95 | Dolina | 1 | 203 | 64 |
| 96 | Dolina | 2 | 168 | 120 |
| 97 | Dolina | 2 | 147 | 52 |
| 98 | Dolina | 0 | 75 | 43 |
| 99 | Dolina | 1 | 153 | 28 |
| 100 | Dolina | 2 | 358 | 87 |
| 101 | Dolina | 0 | 124 | 95 |
| 102 | Dolina | 2 | 326 | 40 |
| 103 | Dolina | 1 | 160 | 44 |
| 104 | Dolina | 1 | 74 | 50 |
| 105 | Dolina | 3 | 262 | 148 |
| 106 | Dolina | 2 | 184 | 77 |
| 107 | Dolina | 2 | 538 | 89 |
| 108 | Dolina | 2 | 296 | 135 |
| 109 | Dolina | 1 | 186 | 45 |
| 110 | Dolina | 0 | 147 | 66 |
| 111 | Dolina | 1 | 63 | 35 |
| 112 | Dolina | 2 | 93 | 29 |
| 113 | Dolina | 0 | 98 | 49 |
| 114 | Dolina | 3 | 290 | 62 |
| 115 | Dolina | 1 | 201 | 84 |
| 116 | Dolina | 2 | 300 | 93 |
| 117 | Dolina | 1 | 180 | 29 |
| 118 | Dolina | 1 | 167 | 51 |
| 119 | Dolina | 1 | 161 | 69 |
| 120 | Dolina | 1 | 139 | 26 |
| 121 | Dolina | 2 | 263 | 53 |
| 122 | Dolina | 2 | 419 | 93 |
| 123 | Dolina | 1 | 82 | 32 |
| 124 | Dolina | 2 | 164 | 41 |
| 125 | Dolina | 0 | 82 | 47 |
| 126 | Dolina | 1 | 95 | 60 |

| ID | Tipo Evolutivo de Depresión Kárstica | Orden de escurrimiento | Largo (m) | Ancho (m) |
|-----|--------------------------------------|------------------------|-----------|-----------|
| 127 | Dolina | 1 | 213 | 55 |
| 128 | Dolina | 1 | 271 | 75 |
| 129 | Dolina | 2 | 220 | 59 |
| 130 | Dolina | 0 | 216 | 132 |
| 131 | Dolina | 2 | 244 | 57 |
| 132 | Dolina | 1 | 304 | 40 |
| 133 | Dolina | 1 | 158 | 70 |
| 134 | Polje de nivel base relictos | 3 | 1042 | 104 |
| 135 | Dolina | 1 | 317 | 57 |
| 136 | Dolina | 2 | 552 | 137 |
| 137 | Dolina | 2 | 563 | 119 |
| 138 | Dolina | 2 | 303 | 84 |
| 139 | Dolina | 2 | 321 | 90 |
| 140 | Dolina | 1 | 265 | 210 |
| 141 | Dolina | 2 | 283 | 83 |
| 142 | Dolina | 1 | 134 | 85 |
| 143 | Dolina | 2 | 240 | 76 |
| 144 | Dolina | 2 | 91 | 50 |
| 145 | Dolina | 2 | 540 | 93 |
| 146 | Dolina | 1 | 165 | 88 |
| 147 | Dolina | 1 | 188 | 53 |
| 148 | Dolina | 0 | 55 | 32 |
| 149 | Dolina | 1 | 143 | 30 |
| 150 | Dolina | 1 | 231 | 75 |
| 151 | Dolina | 1 | 188 | 103 |
| 152 | Dolina | 0 | 73 | 50 |
| 153 | Dolina | 1 | 200 | 52 |
| 154 | Dolina | 1 | 126 | 51 |
| 155 | Dolina | 1 | 109 | 59 |
| 156 | Dolina | 2 | 239 | 50 |
| 157 | Dolina | 2 | 553 | 62 |
| 158 | Dolina | 2 | 284 | 75 |
| 159 | Dolina | 2 | 345 | 134 |
| 160 | Dolina | 1 | 152 | 75 |
| 161 | Dolina | 1 | 112 | 73 |
| 162 | Dolina | 3 | 239 | 81 |
| 163 | Dolina | 2 | 222 | 66 |
| 164 | Dolina | 1 | 130 | 82 |
| 165 | Dolina | 1 | 149 | 57 |
| 166 | Dolina | 0 | 47 | 32 |
| 167 | Dolina | 3 | 409 | 82 |
| 168 | Dolina | 1 | 150 | 87 |
| 169 | Dolina | 2 | 187 | 81 |

| ID | Tipo Evolutivo de Depresión Kárstica | Orden de escurrimiento | Largo (m) | Ancho (m) |
|-----|--------------------------------------|------------------------|-----------|-----------|
| 170 | Dolina | 2 | 126 | 57 |
| 171 | Dolina | 2 | 105 | 51 |
| 172 | Dolina | 2 | 122 | 33 |
| 173 | Dolina | 2 | 130 | 69 |
| 174 | Dolina | 2 | 246 | 67 |
| 175 | Dolina | 1 | 186 | 84 |
| 176 | Dolina | 1 | 146 | 63 |
| 177 | Dolina | 1 | 102 | 55 |
| 178 | Dolina | 2 | 332 | 65 |
| 179 | Dolina | 2 | 491 | 81 |
| 180 | Dolina | 2 | 293 | 46 |
| 181 | Dolina | 1 | 148 | 69 |
| 182 | Dolina | 1 | 574 | 211 |
| 183 | Dolina | 1 | 454 | 101 |
| 184 | Dolina | 2 | 206 | 63 |
| 185 | Dolina | 2 | 272 | 103 |
| 186 | Dolina | 1 | 180 | 95 |
| 187 | Dolina | 1 | 160 | 60 |
| 188 | Dolina | 1 | 204 | 130 |
| 189 | Dolina | 1 | 178 | 134 |
| 190 | Dolina | 1 | 252 | 104 |
| 191 | Dolina | 0 | 141 | 39 |
| 192 | Dolina | 1 | 189 | 69 |
| 193 | Dolina | 2 | 203 | 57 |
| 194 | Dolina | 1 | 520 | 274 |
| 195 | Dolina | 2 | 315 | 96 |
| 196 | Dolina | 1 | 143 | 89 |
| 197 | Dolina | 0 | 55 | 28 |
| 198 | Dolina | 1 | 138 | 54 |
| 199 | Dolina | 1 | 399 | 68 |
| 200 | Dolina | 1 | 201 | 52 |
| 201 | Dolina | 2 | 153 | 76 |
| 202 | Dolina | 1 | 256 | 150 |
| 203 | Dolina | 1 | 159 | 47 |
| 204 | Dolina | 2 | 223 | 65 |
| 205 | Dolina | 1 | 118 | 76 |
| 206 | Dolina | 0 | 60 | 41 |
| 207 | Dolina | 2 | 286 | 92 |
| 208 | Dolina | 2 | 333 | 126 |
| 209 | Dolina | 1 | 360 | 160 |
| 210 | Dolina | 1 | 141 | 67 |
| 211 | Dolina | 1 | 196 | 87 |
| 212 | Dolina | 1 | 112 | 58 |

| ID | Tipo Evolutivo de Depresión Kárstica | Orden de escurrimiento | Largo (m) | Ancho (m) |
|-----|--------------------------------------|------------------------|-----------|-----------|
| 213 | Dolina | 2 | 149 | 99 |
| 214 | Dolina | 1 | 97 | 39 |
| 215 | Dolina | 2 | 673 | 151 |
| 216 | Dolina | 1 | 145 | 96 |
| 217 | Dolina | 2 | 238 | 127 |
| 218 | Dolina | 1 | 172 | 108 |
| 219 | Dolina | 1 | 77 | 42 |
| 220 | Dolina | 1 | 154 | 99 |
| 221 | Dolina | 1 | 405 | 123 |
| 222 | Dolina | 2 | 142 | 67 |
| 223 | Dolina | 2 | 602 | 221 |
| 224 | Dolina | 2 | 184 | 72 |
| 225 | Dolina | 2 | 289 | 173 |
| 226 | Dolina | 1 | 190 | 71 |
| 227 | Dolina | 0 | 93 | 64 |
| 228 | Dolina | 1 | 127 | 67 |
| 229 | Dolina | 1 | 134 | 93 |
| 230 | Dolina | 0 | 129 | 64 |
| 231 | Dolina | 2 | 186 | 82 |
| 232 | Dolina | 2 | 301 | 59 |
| 233 | Dolina | 1 | 185 | 75 |
| 234 | Dolina | 1 | 255 | 143 |
| 235 | Dolina | 2 | 289 | 51 |
| 236 | Dolina | 2 | 200 | 72 |
| 237 | Dolina | 1 | 485 | 52 |
| 238 | Dolina | 1 | 349 | 136 |
| 239 | Dolina | 1 | 205 | 89 |
| 240 | Dolina | 1 | 109 | 25 |
| 241 | Dolina | 1 | 203 | 46 |
| 242 | Dolina | 1 | 146 | 67 |
| 243 | Dolina | 2 | 137 | 83 |
| 244 | Dolina | 1 | 134 | 92 |
| 245 | Dolina | 2 | 217 | 74 |
| 246 | Dolina | 2 | 174 | 86 |
| 247 | Dolina | 1 | 91 | 64 |
| 248 | Dolina | 1 | 391 | 98 |
| 249 | Dolina | 1 | 115 | 50 |
| 250 | Dolina | 3 | 621 | 111 |
| 251 | Dolina | 0 | 75 | 45 |
| 252 | Dolina | 2 | 502 | 146 |
| 253 | Dolina | 1 | 247 | 85 |
| 254 | Dolina | 2 | 741 | 139 |
| 255 | Dolina | 1 | 192 | 91 |

| ID | Tipo Evolutivo de Depresión Kárstica | Orden de escurrimiento | Largo (m) | Ancho (m) |
|-----|--------------------------------------|------------------------|-----------|-----------|
| 256 | Dolina | 1 | 583 | 91 |
| 257 | Dolina | 1 | 116 | 40 |
| 258 | Dolina | 1 | 63 | 26 |
| 259 | Dolina | 2 | 239 | 95 |
| 260 | Dolina | 1 | 83 | 79 |
| 261 | Dolina | 1 | 61 | 20 |
| 262 | Dolina | 1 | 147 | 97 |
| 263 | Dolina | 1 | 130 | 83 |
| 264 | Dolina | 2 | 68 | 27 |
| 265 | Dolina | 2 | 327 | 102 |
| 266 | Dolina | 1 | 98 | 58 |
| 267 | Dolina | 3 | 549 | 176 |
| 268 | Dolina | 1 | 127 | 56 |
| 269 | Dolina | 2 | 196 | 69 |
| 270 | Dolina | 1 | 199 | 141 |
| 271 | Dolina | 1 | 133 | 75 |
| 272 | Dolina | 1 | 149 | 102 |
| 273 | Dolina | 1 | 74 | 22 |
| 274 | Dolina | 1 | 839 | 65 |
| 275 | Dolina | 1 | 283 | 152 |
| 276 | Dolina | 1 | 207 | 50 |
| 277 | Dolina | 1 | 169 | 85 |
| 278 | Dolina | 1 | 257 | 66 |
| 279 | Dolina | 2 | 172 | 50 |
| 280 | Polje de nivel base | 2 | 921 | 255 |
| 281 | Dolina | 2 | 526 | 129 |
| 282 | Dolina | 1 | 154 | 85 |

Apéndice 2. Caracteres Morfométricos de las Colinas Kársticas Residuales en el Parque Estatal de la Sierra de Tabasco

| ID | Pendiente (grados) | Irregular | Regular | Altura (m) | Anchura (m) | Tipo de Colina Kárstica Residual |
|----|--------------------|-----------|---------|------------|-------------|----------------------------------|
| 1 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 2 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 3 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 4 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 5 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 6 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 7 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 8 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 9 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 10 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 11 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 12 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 13 | <60 | | 1 | 60 | | Cono |
| 14 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 15 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 16 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 17 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 18 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 19 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 20 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 21 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 22 | <60 | 1 | | 10 | | Cúpula |
| 23 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 24 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 25 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 26 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 27 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 28 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 29 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 30 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 31 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 32 | <60 | 1 | | 10 | | Cúpula |
| 33 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 34 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 35 | <60 | 1 | | 10 | | Cúpula |
| 36 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 37 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 38 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 39 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 40 | <60 | 1 | | 10 | | Cúpula |
| 41 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |

| ID | Pendiente (grados) | Irregular | Regular | Altura (m) | Anchura (m) | Tipo de Colina Kárstica |
|----|--------------------|-----------|---------|------------|-------------|-------------------------|
| 42 | <60 | | 1 | 10 | | Residual Cono |
| 43 | <60 | 1 | | 25 | | Cúpula |
| 44 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 45 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 46 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 47 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 48 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 49 | <60 | 1 | | 10 | | Cúpula |
| 50 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 51 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 52 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 53 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 54 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 55 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 56 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 57 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 58 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 59 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 60 | <60 | | 1 | 60 | | Cono |
| 61 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 62 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 63 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 64 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 65 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 66 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 67 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 68 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 69 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 70 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 71 | <60 | 1 | | 10 | | Cúpula |
| 72 | <60 | | 1 | 65 | | Cono |
| 73 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 74 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 75 | <60 | | 1 | 70 | | Cono |
| 76 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 77 | <60 | 1 | | 20 | | Cúpula |
| 78 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 79 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 80 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 81 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 82 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 83 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 84 | <60 | | 1 | 50 | | Cono |

| ID | Pendiente (grados) | Irregular | Regular | Altura (m) | Anchura (m) | Tipo de Colina Kárstica |
|-----|--------------------|-----------|---------|------------|-------------|-------------------------|
| 85 | <60 | | 1 | 10 | | Residual Cono |
| 86 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 87 | <60 | | 1 | 75 | | Cono |
| 88 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 89 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 90 | <60 | 1 | | 30 | | Cúpula |
| 91 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 92 | <60 | | 1 | 115 | | Cono |
| 93 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 94 | <60 | | 1 | 75 | | Cono |
| 95 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 96 | <60 | | 1 | 50 | | Cono |
| 97 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 98 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 99 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 100 | <60 | | 1 | 60 | | Cono |
| 101 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 102 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 103 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 104 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 105 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 106 | >60 | | | 275 | 262 | Torre |
| 107 | <60 | 1 | | 10 | | Cúpula |
| 108 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 109 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 110 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 111 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 112 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 113 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 114 | <60 | | 1 | 60 | | Cono |
| 115 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 116 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 117 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 118 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 119 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 120 | <60 | 1 | | 25 | | Cúpula |
| 121 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 122 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 123 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 124 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 125 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 126 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 127 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |

| ID | Pendiente (grados) | Irregular | Regular | Altura (m) | Anchura (m) | Tipo de Colina Kárstica |
|-----|--------------------|-----------|---------|------------|-------------|-------------------------|
| 128 | <60 | | 1 | 15 | | Residual Cono |
| 129 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 130 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 131 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 132 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 133 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 134 | <60 | | 1 | 50 | | Cono |
| 135 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 136 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 137 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 138 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 139 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 140 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 141 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 142 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 143 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 144 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 145 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 146 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 147 | <60 | | 1 | 60 | | Cono |
| 148 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 149 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 150 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 151 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 152 | <60 | | 1 | 50 | | Cono |
| 153 | >60 | | | 325 | 291 | Torre |
| 154 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 155 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 156 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 157 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 158 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 159 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 160 | <60 | | 1 | 50 | | Cono |
| 161 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 162 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 163 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 164 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 165 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 166 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 167 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 168 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 169 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 170 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |

| ID | Pendiente (grados) | Irregular | Regular | Altura (m) | Anchura (m) | Tipo de Colina Kárstica |
|-----|--------------------|-----------|---------|------------|-------------|-------------------------|
| 171 | <60 | | 1 | 60 | | Residual Cono |
| 172 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 173 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 174 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 175 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 176 | <60 | | 1 | 90 | | Cono |
| 177 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 178 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 179 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 180 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 181 | <60 | 1 | | 20 | | Cúpula |
| 182 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 183 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 184 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 185 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 186 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 187 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 188 | <60 | | 1 | 60 | | Cono |
| 189 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 190 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 191 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 192 | <60 | | 1 | 50 | | Cono |
| 193 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 194 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 195 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 196 | <60 | | 1 | 70 | | Cono |
| 197 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 198 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 199 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 200 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 201 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 202 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 203 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 204 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 205 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 206 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 207 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 208 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 209 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 210 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 211 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 212 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 213 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |

| ID | Pendiente (grados) | Irregular | Regular | Altura (m) | Anchura (m) | Tipo de Colina Kárstica |
|-----|--------------------|-----------|---------|------------|-------------|-------------------------|
| 214 | <60 | | 1 | 15 | | Residual Cono |
| 215 | <60 | | 1 | 80 | | Cono |
| 216 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 217 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 218 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 219 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 220 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 221 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 222 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 223 | <60 | | 1 | 60 | | Cono |
| 224 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 225 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 226 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 227 | <60 | | 1 | 65 | | Cono |
| 228 | <60 | | 1 | 70 | | Cono |
| 229 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 230 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 231 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 232 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 233 | <60 | | 1 | 65 | | Cono |
| 234 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 235 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 236 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 237 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 238 | <60 | 1 | | 25 | | Cúpula |
| 239 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 240 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 241 | >60 | | | 105 | 73 | Torre |
| 242 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 243 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 244 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 245 | <60 | 1 | | 10 | | Cúpula |
| 246 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 247 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 248 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 249 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 250 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 251 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 252 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 253 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 254 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 255 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 256 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |

| ID | Pendiente (grados) | Irregular | Regular | Altura (m) | Anchura (m) | Tipo de Colina Kárstica |
|-----|--------------------|-----------|---------|------------|-------------|-------------------------|
| 257 | <60 | | 1 | 35 | | Residual Cono |
| 258 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 259 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 260 | <60 | | 1 | 50 | | Cono |
| 261 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 262 | <60 | | 1 | 100 | | Cono |
| 263 | <60 | | 1 | 60 | | Cono |
| 264 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 265 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 266 | <60 | | 1 | 65 | | Cono |
| 267 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 268 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 269 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 270 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 271 | <60 | | 1 | 50 | | Cono |
| 272 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 273 | >60 | | | 145 | 220 | Mogote |
| 274 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 275 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 276 | <60 | 1 | | 5 | | Cúpula |
| 277 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 278 | <60 | | 1 | 60 | | Cono |
| 279 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 280 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 281 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 282 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 283 | <60 | 1 | | 10 | | Cúpula |
| 284 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 285 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 286 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 287 | <60 | 1 | | 10 | | Cúpula |
| 288 | <60 | 1 | | 25 | | Cúpula |
| 289 | <60 | 1 | | 20 | | Cúpula |
| 290 | <60 | | 1 | 65 | | Cono |
| 291 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 292 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 293 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 294 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 295 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 296 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 297 | <60 | 1 | | 30 | | Cúpula |
| 298 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 299 | <60 | | 1 | 110 | | Cono |

| ID | Pendiente (grados) | Irregular | Regular | Altura (m) | Anchura (m) | Tipo de Colina Kárstica |
|-----|--------------------|-----------|---------|------------|-------------|-------------------------|
| 300 | <60 | | 1 | 15 | | Residual Cono |
| 301 | <60 | | 1 | 80 | | Cono |
| 302 | <60 | 1 | | 25 | | Cúpula |
| 303 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 304 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 305 | <60 | | 1 | 95 | | Cono |
| 306 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 307 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 308 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 309 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 310 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 311 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 312 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 313 | <60 | 1 | | 15 | | Cúpula |
| 314 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 315 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 316 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 317 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 318 | <60 | 1 | | 10 | | Cúpula |
| 319 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 320 | <60 | | 1 | 130 | | Cono |
| 321 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 322 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 323 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 324 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 325 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 326 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 327 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 328 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 329 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 330 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 331 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 332 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 333 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 334 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 335 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 336 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 337 | <60 | | 1 | 70 | | Cono |
| 338 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 339 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 340 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 341 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 342 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |

| ID | Pendiente (grados) | Irregular | Regular | Altura (m) | Anchura (m) | Tipo de Colina Kárstica |
|-----|--------------------|-----------|---------|------------|-------------|-------------------------|
| 343 | <60 | | 1 | 40 | | Residual Cono |
| 344 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 345 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 346 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 347 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 348 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 349 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 350 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 351 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 352 | <60 | 1 | | 50 | | Cúpula |
| 353 | >60 | | | 210 | 181 | Torre |
| 354 | <60 | | 1 | 50 | | Cono |
| 355 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 356 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 357 | <60 | | 1 | 50 | | Cono |
| 358 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 359 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 360 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 361 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 362 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 363 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 364 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 365 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 366 | <60 | 1 | | 20 | | Cúpula |
| 367 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 368 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 369 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 370 | <60 | | 1 | 60 | | Cono |
| 371 | <60 | | 1 | 60 | | Cono |
| 372 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 373 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 374 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 375 | <60 | 1 | | 15 | | Cúpula |
| 376 | <60 | | 1 | 85 | | Cono |
| 377 | <60 | | 1 | 65 | | Cono |
| 378 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 379 | <60 | 1 | | 30 | | Cúpula |
| 380 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 381 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 382 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 383 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 384 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 385 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |

| ID | Pendiente (grados) | Irregular | Regular | Altura (m) | Anchura (m) | Tipo de Colina Kárstica |
|-----|--------------------|-----------|---------|------------|-------------|-------------------------|
| 386 | <60 | 1 | | 20 | | Residual Cúpula |
| 387 | <60 | 1 | | 20 | | Cúpula |
| 388 | <60 | 1 | | 15 | | Cúpula |
| 389 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 390 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 391 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 392 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 393 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 394 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 395 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 396 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 397 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 398 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 399 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 400 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 401 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 402 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 403 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 404 | <60 | 1 | | 10 | | Cúpula |
| 405 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 406 | <60 | 1 | | 25 | | Cúpula |
| 407 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 408 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 409 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 410 | <60 | | 1 | 60 | | Cono |
| 411 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 412 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 413 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 414 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 415 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 416 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 417 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 418 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 419 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 420 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 421 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 422 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 423 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 424 | <60 | | 1 | 5 | | Cono |
| 425 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 426 | <60 | | 1 | 65 | | Cono |
| 427 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 428 | <60 | | 1 | 5 | | Cono |

| ID | Pendiente (grados) | Irregular | Regular | Altura (m) | Anchura (m) | Tipo de Colina Kárstica |
|-----|--------------------|-----------|---------|------------|-------------|-------------------------|
| 429 | <60 | | 1 | 40 | | Residual Cono |
| 430 | <60 | | 1 | 70 | | Cono |
| 431 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 432 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 433 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 434 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 435 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 436 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 437 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 438 | <60 | | 1 | 80 | | Cono |
| 439 | <60 | 1 | | 10 | | Cúpula |
| 440 | <60 | | 1 | 125 | | Cono |
| 441 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 442 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 443 | <60 | | 1 | 50 | | Cono |
| 444 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 445 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 446 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 447 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 448 | <60 | 1 | | 20 | | Cúpula |
| 449 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 450 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 451 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 452 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 453 | <60 | | 1 | 60 | | Cono |
| 454 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 455 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 456 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 457 | <60 | 1 | | 20 | | Cúpula |
| 458 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 459 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 460 | <60 | 1 | | 10 | | Cúpula |
| 461 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 462 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 463 | <60 | | 1 | 50 | | Cono |
| 464 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 465 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 466 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 467 | <60 | | 1 | 50 | | Cono |
| 468 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 469 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 470 | <60 | | 1 | 60 | | Cono |
| 471 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |

| ID | Pendiente (grados) | Irregular | Regular | Altura (m) | Anchura (m) | Tipo de Colina Kárstica |
|-----|--------------------|-----------|---------|------------|-------------|-------------------------|
| 472 | <60 | | 1 | 45 | | Residual Cono |
| 473 | <60 | | 1 | 80 | | Cono |
| 474 | <60 | | 1 | 80 | | Cono |
| 475 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 476 | <60 | 1 | | 15 | | Cúpula |
| 477 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 478 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 479 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 480 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 481 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 482 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 483 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 484 | <60 | | 1 | 180 | | Cono |
| 485 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 486 | <60 | | 1 | 80 | | Cono |
| 487 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 488 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 489 | <60 | | 1 | 65 | | Cono |
| 490 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 491 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 492 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 493 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 494 | <60 | | 1 | 90 | | Cono |
| 495 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 496 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 497 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 498 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 499 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 500 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 501 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 502 | <60 | 1 | | 10 | | Cúpula |
| 503 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 504 | <60 | | 1 | 50 | | Cono |
| 505 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 506 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 507 | <60 | | 1 | 60 | | Cono |
| 508 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 509 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 510 | <60 | 1 | | 10 | | Cúpula |
| 511 | >60 | | | 90 | 142 | Mogote |
| 512 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 513 | >60 | | | 125 | 176 | Mogote |
| 514 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |

| ID | Pendiente (grados) | Irregular | Regular | Altura (m) | Anchura (m) | Tipo de Colina Kárstica |
|-----|--------------------|-----------|---------|------------|-------------|-------------------------|
| 515 | <60 | | 1 | 30 | | Residual Cono |
| 516 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 517 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 518 | <60 | 1 | | 20 | | Cúpula |
| 519 | <60 | | 1 | 50 | | Cono |
| 520 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 521 | <60 | | 1 | 75 | | Cono |
| 522 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 523 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 524 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 525 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 526 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 527 | <60 | 1 | | 35 | | Cúpula |
| 528 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 529 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 530 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 531 | <60 | | 1 | 60 | | Cono |
| 532 | >60 | | | 125 | 182 | Mogote |
| 533 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 534 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 535 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 536 | <60 | | 1 | 65 | | Cono |
| 537 | <60 | | 1 | 70 | | Cono |
| 538 | <60 | | 1 | 80 | | Cono |
| 539 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 540 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 541 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 542 | >60 | | | 80 | 163 | Mogote |
| 543 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 544 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 545 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 546 | >60 | | | 115 | 178 | Mogote |
| 547 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 548 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 549 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 550 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 551 | <60 | 1 | | 15 | | Cúpula |
| 552 | >60 | | | 50 | 48 | Torre |
| 553 | >60 | | | 125 | 163 | Mogote |
| 554 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 555 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 556 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 557 | <60 | | 1 | 140 | | Cono |

| ID | Pendiente (grados) | Irregular | Regular | Altura (m) | Anchura (m) | Tipo de Colina Kárstica Residual |
|-----|--------------------|-----------|---------|------------|-------------|----------------------------------|
| 558 | >60 | | | 140 | 134 | Torre |
| 559 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 560 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 561 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 562 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 563 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 564 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 565 | <60 | 1 | | 30 | | Cúpula |
| 566 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 567 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 568 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 569 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 570 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 571 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 572 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 573 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 574 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 575 | <60 | | 1 | 80 | | Cono |
| 576 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 577 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 578 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 579 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 580 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 581 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 582 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 583 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 584 | <60 | | 1 | 70 | | Cono |
| 585 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 586 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 587 | >60 | | | 65 | 76 | Mogote |
| 588 | >60 | | | 95 | 94 | Torre |
| 589 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 590 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 591 | <60 | | 1 | 60 | | Cono |
| 592 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 593 | >60 | | | 155 | 187 | Mogote |
| 594 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 595 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 596 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 597 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 598 | <60 | | 1 | 65 | | Cono |
| 599 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 600 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |

| ID | Pendiente (grados) | Irregular | Regular | Altura (m) | Anchura (m) | Tipo de Colina Kárstica |
|-----|--------------------|-----------|---------|------------|-------------|-------------------------|
| 601 | <60 | | 1 | 40 | | Residual Cono |
| 602 | >60 | | | 85 | 80 | Torre |
| 603 | <60 | | 1 | 50 | | Cono |
| 604 | <60 | | 1 | 65 | | Cono |
| 605 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 606 | >60 | | | 95 | 124 | Mogote |
| 607 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 608 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 609 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 610 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 611 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 612 | >60 | | | 80 | 102 | Mogote |
| 613 | <60 | | 1 | 50 | | Cono |
| 614 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 615 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 616 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 617 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 618 | >60 | | | 125 | 144 | Mogote |
| 619 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 620 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 621 | <60 | | 1 | 50 | | Cono |
| 622 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 623 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 624 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 625 | >60 | | | 165 | 157 | Torre |
| 626 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 627 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 628 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 629 | <60 | | 1 | 60 | | Cono |
| 630 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 631 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 632 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 633 | >60 | | | 125 | 105 | Torre |
| 634 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 635 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 636 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 637 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 638 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 639 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 640 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 641 | >60 | | | 70 | 66 | Torre |
| 642 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 643 | >60 | | | 145 | 140 | Torre |

| ID | Pendiente (grados) | Irregular | Regular | Altura (m) | Anchura (m) | Tipo de Colina Kárstica |
|-----|--------------------|-----------|---------|------------|-------------|-------------------------|
| 644 | >60 | | | 75 | 95 | Residual Mogote |
| 645 | <60 | | 1 | 60 | | Cono |
| 646 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 647 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 648 | <60 | | 1 | 60 | | Cono |
| 649 | <60 | 1 | | 40 | | Cúpula |
| 650 | >60 | | | 130 | 108 | Torre |
| 651 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 652 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 653 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 654 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 655 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 656 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 657 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 658 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 659 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 660 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 661 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 662 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 663 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 664 | >60 | | | 110 | 181 | Mogote |
| 665 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 666 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 667 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 668 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 669 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 670 | <60 | | 1 | 50 | | Cono |
| 671 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 672 | >60 | | | 85 | 133 | Mogote |
| 673 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 674 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 675 | >60 | | | 85 | 123 | Mogote |
| 676 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 677 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 678 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 679 | <60 | 1 | | 10 | | Cúpula |
| 680 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 681 | >60 | | | 60 | 86 | Mogote |
| 682 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 683 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 684 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 685 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 686 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |

| ID | Pendiente (grados) | Irregular | Regular | Altura (m) | Anchura (m) | Tipo de Colina Kárstica |
|-----|--------------------|-----------|---------|------------|-------------|-------------------------|
| 687 | <60 | | 1 | 30 | | Residual Cono |
| 688 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 689 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 690 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 691 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 692 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 693 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 694 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 695 | <60 | | 1 | 50 | | Cono |
| 696 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 697 | >60 | | | 65 | 75 | Mogote |
| 698 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 699 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 700 | <60 | | 1 | 80 | | Cono |
| 701 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 702 | <60 | | 1 | 60 | | Cono |
| 703 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 704 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 705 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 706 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 707 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 708 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 709 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 710 | >60 | | | 90 | 151 | Mogote |
| 711 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 712 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 713 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 714 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 715 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 716 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 717 | >60 | | | 65 | 118 | Mogote |
| 718 | >60 | | | 65 | 158 | Mogote |
| 719 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 720 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 721 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 722 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 723 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 724 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 725 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 726 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 727 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 728 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 729 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |

| ID | Pendiente (grados) | Irregular | Regular | Altura (m) | Anchura (m) | Tipo de Colina Kárstica |
|-----|--------------------|-----------|---------|------------|-------------|-------------------------|
| 730 | <60 | | 1 | 10 | | Residual Cono |
| 731 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 732 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 733 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 734 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 735 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 736 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 737 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 738 | <60 | 1 | | 15 | | Cúpula |
| 739 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 740 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 741 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 742 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 743 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 744 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 745 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 746 | <60 | 1 | | 10 | | Cúpula |
| 747 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 748 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 749 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 750 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 751 | <60 | 1 | | 10 | | Cúpula |
| 752 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 753 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 754 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 755 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 756 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 757 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 758 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 759 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 760 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 761 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 762 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 763 | <60 | 1 | | 10 | | Cúpula |
| 764 | <60 | | 1 | 5 | | Cono |
| 765 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 766 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 767 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 768 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 769 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 770 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 771 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 772 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |

| ID | Pendiente (grados) | Irregular | Regular | Altura (m) | Anchura (m) | Tipo de Colina Kárstica |
|-----|--------------------|-----------|---------|------------|-------------|-------------------------|
| 773 | <60 | | 1 | 10 | | Residual Cono |
| 774 | <60 | 1 | | 15 | | Cúpula |
| 775 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 776 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 777 | <60 | | 1 | 75 | | Cono |
| 778 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 779 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 780 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 781 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 782 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 783 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 784 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 785 | <60 | | 1 | 80 | | Cono |
| 786 | <60 | 1 | | 10 | | Cúpula |
| 787 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 788 | <60 | 1 | | 10 | | Cúpula |
| 789 | <60 | 1 | | 35 | | Cúpula |
| 790 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 791 | <60 | | 1 | 70 | | Cono |
| 792 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 793 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 794 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 795 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 796 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 797 | <60 | 1 | | 10 | | Cúpula |
| 798 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 799 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 800 | >60 | | | 90 | 128 | Mogote |
| 801 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 802 | <60 | | 1 | 60 | | Cono |
| 803 | >60 | | | 120 | 115 | Torre |
| 804 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 805 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 806 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 807 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 808 | <60 | | 1 | 50 | | Cono |
| 809 | <60 | 1 | | 20 | | Cúpula |
| 810 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 811 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 812 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 813 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 814 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 815 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |

| ID | Pendiente (grados) | Irregular | Regular | Altura (m) | Anchura (m) | Tipo de Colina Kárstica |
|-----|--------------------|-----------|---------|------------|-------------|-------------------------|
| 816 | <60 | | 1 | 80 | | Residual Cono |
| 817 | <60 | | 1 | 75 | | Cono |
| 818 | <60 | 1 | | 30 | | Cúpula |
| 819 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 820 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 821 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 822 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 823 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 824 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 825 | <60 | 1 | | 20 | | Cúpula |
| 826 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 827 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 828 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 829 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 830 | <60 | 1 | | 30 | | Cúpula |
| 831 | <60 | | 1 | 65 | | Cono |
| 832 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 833 | <60 | | 1 | 70 | | Cono |
| 834 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 835 | <60 | | 1 | 95 | | Cono |
| 836 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 837 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 838 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 839 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 840 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 841 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 842 | <60 | | 1 | 60 | | Cono |
| 843 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 844 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 845 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 846 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 847 | <60 | | 1 | 75 | | Cono |
| 848 | >60 | | | 40 | 60 | Mogote |
| 849 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 850 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 851 | <60 | | 1 | 110 | | Cono |
| 852 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 853 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 854 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 855 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 856 | <60 | | 1 | 60 | | Cono |
| 857 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 858 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |

| ID | Pendiente (grados) | Irregular | Regular | Altura (m) | Anchura (m) | Tipo de Colina Kárstica |
|-----|--------------------|-----------|---------|------------|-------------|-------------------------|
| 859 | <60 | | 1 | 70 | | Residual Cono |
| 860 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 861 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 862 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 863 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 864 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 865 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 866 | <60 | | 1 | 40 | | Cono |
| 867 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 868 | <60 | | 1 | 50 | | Cono |
| 869 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 870 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 871 | <60 | | 1 | 50 | | Cono |
| 872 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 873 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 874 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 875 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 876 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 877 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 878 | >60 | | | 80 | 140 | Mogote |
| 879 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 880 | <60 | | 1 | 50 | | Cono |
| 881 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 882 | <60 | | 1 | 50 | | Cono |
| 883 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 884 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 885 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 886 | <60 | | 1 | 45 | | Cono |
| 887 | <60 | | 1 | 95 | | Cono |
| 888 | >60 | | | 100 | 155 | Mogote |
| 889 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 890 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 891 | <60 | | 1 | 20 | | Cono |
| 892 | <60 | | 1 | 25 | | Cono |
| 893 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |
| 894 | <60 | | 1 | 15 | | Cono |
| 895 | <60 | | 1 | 90 | | Cono |
| 896 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 897 | <60 | | 1 | 55 | | Cono |
| 898 | <60 | | 1 | 30 | | Cono |
| 899 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 900 | <60 | | 1 | 35 | | Cono |
| 901 | <60 | | 1 | 10 | | Cono |

| ID | Pendiente (grados) | Irregular | Regular | Altura (m) | Anchura (m) | Tipo de Colina Kárstica Residual |
|-----|--------------------|-----------|---------|------------|-------------|----------------------------------|
| 902 | <60 | | 1 | 5 | | Cono |

7. REFERENCIAS

- Abdullah, Anwar, Akhir, Juhari Mat y Abdullah, Ibrahim. 2010.** Automatic Mapping of Lineaments Using Shaded Relief Images Derived from Digital Elevation Model (DEMs) in the Maran - Sungai Lembing Area, Malaysia. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2010, Vol. 15, págs. 949-957pp.
- Advameg, Inc. 2011.** Science Clarified. *Fault*. [En línea] 2011. <http://www.scienceclarified.com/landforms/Faults-to-Mountains/Fault.html>.
- Aguilar, Alfredo. 2005.** *Estudio geológico de la estructura Coconá, Municipio de Teapa, Tabasco*. Petróleos Mexicanos. s.l. : Petróleos Mexicanos, 2005.
- Ahnert, F. y Williams, P. W. (1997) 2007.** Karst landform development in a three-dimensional theoretical model. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (1997) 2007, págs. 398, 399.
- Arriaga Cabrera, Laura, Aguilar Sierra, Verónica y Alcocer Durand, Javier. 2000.** *Agua Continentales y Diversidad Biológica de México*. México D.F. : Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 2000. pág. 327p.
- Asociación Internacional de Ecología del Paisaje. (1998) 2006.** Congreso. [aut. libro] Pedro Irastorza Vaca. *Integración de la Ecología del Paisaje en la Planificación Territorial. Aplicación a la Comunidad de Madrid*. Madrid : Tesis Doctoral (Ingeniero de Montes) Universidad Politécnica de Madrid, (1998) 2006, pág. 274p.
- Ávila, Edgar. 2011.** Sismo de 6.7 grados provoca ola de pánico en el sureste. *El Universal*. Digital, 08 de Abril de 2011.
- Bakalowicz, M. (1992) 2007.** Géochemie des eaux et flux de matières dissoutes: l'approche objective du rôle du climat dans le karstogenese. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (1992) 2007.
- Balazs, D. y Day, M. J. (1973;1978) 2007.** Relief types of tropical karst areas; Morphology and distribution of residual limestone hills (mogotes) in the karst of northern Puerto Rico. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (1973;1978) 2007, pág. 351.
- Baskoro, Karyadi. 2009.** Flickr de Yahoo. *Galería de Kang Bas*. [En línea] 2009. <http://www.flickr.com/photos/kangbas/3909960286/in/photostream/>.
- Beddows, P. A. (2004) 2004.** Yucatán phreas, Mexico. [ed.] J. Gunn. *Encyclopedia of caves and karst science*. New York : Fitzroy Dearborn, (2004) 2004, pág. 1677.
- BedinCuba. 2011.** BedinCuba. *Mogotes*. [En línea] 2011. <http://www.bedincuba.com/cuba/fotos/mogote.jpg>.
- Bezaury Creel, J. E., y otros. 2009.** Base de Datos Geográfica de Áreas Naturales Protegidas Estatales y del Distrito Federal de México, 2009. [ESRI Shapefile Escala:1400000]. Ciudad de México : Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 2009.
- Bögli, A. (1980) 1996.** Karst Hydrology and Physical Speleology. [aut. libro] Javier de Pedraza Gilsanz. *Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones*. Madrid : Rueda, (1980) 1996, pág. 330.
- Brook, G. A. y Ford, D. C. (1980) 2007.** Hydrology of the Nahanni karst, northern Canada the importance of extreme summer storms. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (1980) 2007, pág. 362.
- . **1978.** The origin of labyrinth and tower karst and the climatic conditions necessary for their development. *Nature*. 1978, Vol. 275 No. 12, págs. 493-496pp.
- Cable News Network. 2010.** Noticias Nacionales. *Las inundaciones en Tabasco provocan más de 60 mil damnificados*. [En línea] 2010. <http://www.cnn.mx/nacional/2010/08/28/las-inundaciones-en-tabasco-provocan-mas-de-60-mil-damnificados>.
- Calvo, Alfonso Benito. 2010.** Author Stream. *Geodiversidad*. [En línea] 2010. http://www.authorstream.com/Presentation/alfonso_bc-712632-geodiversidad/.
- Capel, Horacio y Urteaga, J. Luis. 1982.** *Las nuevas geografías*. Barcelona : Aula Abierta Salvat, 1982. pág. 65p.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

- Carcavilla, L., Durán, J. J. y López Martínez, J. 2008.** Geodiversidad: concepto y relación con el patrimonio geológico. [aut. libro] VII Congreso Geológico de España. *Geo-Temas*. Las Palmas de Gran Canaria : VII Congreso Geológico de España, 2008, Vol. No. 10, págs. 1299-1303pp.
- Cardoso C., María Dolores. 1979.** *El clima de Chiapas y Tabasco*. Ciudad Universitaria : U.N.A.M., 1979. pág. 99.
- Carvajal, Henry, y otros. 2004.** Instituto Colombiano de Geología y Minería. Subdirección de Geología Básica. Proyecto Compilación y Levantamiento de la Información Geomecánica. *Propuesta Metodológica para el Desarrollo de la Cartografía Geomorfológica para la Zonación Geomecánica*. [En línea] 2004. http://www1.ingeminas.gov.co/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=3887&Itemid=87.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. 2006.** Sistema integral de información sobre riesgo de desastres en México. Atlas Nacional de Riesgos. *Fenómenos Geológicos*. [En línea] 2006. <http://atl.cenapred.unam.mx/metadataexplorer/index.html>.
- . **2006.** Sistema integral de información sobre riesgo de desastres en México. Atlas Nacional de Riesgos. *Mapa de Intensidades Sísmicas*. [En línea] 2006. <http://atl.cenapred.unam.mx/website/RiesgosGeologicos/Sismos/viewer.htm>.
- . **2006.** Sistema integral de información sobre riesgo de desastres en México. Atlas Nacional de Riesgos. *Mapa de Peligro Sísmico*. [En línea] 2006. <http://atl.cenapred.unam.mx/website/RiesgosGeologicos/PeligroSismico/viewer.htm>.
- Cervantes Zamora, Y., y otros. 1990.** Provincias Fisiográficas de México. [ESRI Shapefile Escala 1:4000000]. Ciudad de México : Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 1990.
- Choquette, P.W. y Pray, L.C. (1970) 2007.** Geological nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (1970) 2007, pág. 30.
- Chou, L., Garrels, R. M. y Wollast, R. (1989) 2008.** Comparative study of the kinetics and mechanisms of dissolution of carbonate minerals. [aut. libro] Mateo Gutiérrez Elorza. *Geomorfología*. Madrid : Pearson Educación, S.A. Prentice Hall, (1989) 2008, pág. 180.
- Chuvienco Salinero, Emilio. 2008.** *Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio*. Barcelona : Ariel ciencia, 2008. pág. 594p. il.
- Coalición Ciudadana Aysén Reserva de Vida. 2011.** *Glosario Ambiental*. [En línea] 2011. <http://glosarioambiental.blogspot.com/>.
- Cockpit Country Stakeholders Group. 2006.** Save Cockpit Country. *Karst*. [En línea] 2006. <http://www.cockpitcountry.com/Karst.html>.
- Cohen, Robert A. 2007.** An Introduction to PROC LOESS for Local Regression. *SAS Technical Papers*. Cary : SAS Institute Inc., 2007, Vol. No.273, pág. 9p.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 2010.** Sistema de información Geográfica. *Áreas Protegidas de México*. [En línea] 2010. <http://www.conanp.gob.mx/sig/>.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 2008.** *Identificación de sitios prioritarios para la ampliación del Corredor Biológico Mesoamericano en los Estados de Tabasco, Oaxaca y Veracruz. El caso de Tabasco*. [En línea] 2008. http://www.sernapam.tabasco.gob.mx/CorredorBiologico/sitios_prioritarios.pdf.
- . **1997.** Provincias biogeográficas de México. [ESRI Shapefile Escala:14000000]. Ciudad de México : Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 1997.
- Cvijic, J. (1924b) 2008.** Types morphologiques de terrains calcaires. [aut. libro] Mateo Gutiérrez Elorza. *Geomorfología*. Madrid : Pearson Educación, S.A. Prentice Hall, (1924b) 2008, pág. 209.
- Dasmann, Raymond F. 1984.** *Environmental Conservation*. New York : John Wiley & Sons, 1984. pág. 231p.
- Day, M. (2004) 2004.** Cone Karst. [ed.] J. Gunn. *Encyclopedia of caves and karst science*. New York : Fitzroy Dearborn, (2004) 2004, pág. 495.
- Day, M. y Tang, T. (2004) 2004.** Tower Karst. [ed.] J. Gunn. *Encyclopedia of caves and karst science*. New York : Fitzroy Dearborn, (2004) 2004, pág. 1571.

- Day, M.J. (1983) 2007.** Doline morphology and development in Barbados. *Annals of the Association of American Geographers* 73(2), 206-19. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (1983) 2007, pág. 29.
- De Blij, Harm J., Muller, Peter O. y Williams, Richard S. 2004.** *Physical Geography*. Oxford : Oxford University Press, 2004. pág. 702p.
- Díaz del Olmo, F. y Cámara Artigas, R. 2003.** Karst tropical de colinas, tipología y evolución en el Plio-Cuaternario en República Dominicana. *XI Reunión Nacional de Cuaternario*. s.l. : Universidad de Oviedo, 2003.
- Dingwall, Paul. 2003.** Purnululu's Bungle Bungle Karst joins the World's Conservation Elite. *Australasian Cave and Karst Management Association Incorporated Journal*. 2003. No. 52.
- Dreybrodt, W. (2004) 2008.** Dissolution: Carbonate Rocks. [aut. libro] Mateo Gutiérrez Elorza. *Geomorfología*. Madrid : Pearson Educación, S.A. Prentice Hall, (2004) 2008, pág. 178.
- Duckeck, Jochen. 2011.** Show Caves of the World. *Tower Karst*. [En línea] 2011. <http://www.showcaves.com/english/explain/Karst/index.html>.
- El Colegio de la Frontera Sur. 2007.** Laboratorio de Análisis de Información Geográfica y Estadística. Base Geográfica Digital. *Regiones Económicas del Estado de Tabasco*. [En línea] 2007. http://200.23.34.25:82/website/TABASCO_REGIONES/viewer.htm.
- Embry, A. F. y Klován, J. E. (1971) 2007.** A Late Devonian reef tract in northeastern Banks Island, Northwest Territories. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (1971) 2007, pág. 16.
- Encyclopedia Britannica. 2011.** Science & Technology. [En línea] 2011. <http://www.britannica.com/>.
- Espinosa Pereña, Ramón. 1990.** *Propuesta de Clasificación de Karst de la República Mexicana*. Ciudad de México : Tesis de Licenciatura (Ingeniero Geólogo) Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería, 1990.
- ESRI. 2011.** ArcGIS Resource Center. Desktop 10. *Densidad kernel (Spatial Analyst)*. [En línea] 2011. <http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/na/009z0000000s000000/>.
- Fleurant, C., Tucker, G. E. y Viles, H. A. 2008.** Modelling cockpit karst landforms. *Geological Society, London, Special Publications*. London : Geological Society, 2008, Vol. 296, págs. 47-62pp.
- Ford, Derek y Williams, Paul. (1989) 2007.** Karst Geomorphology and Hydrology. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (1989) 2007.
- . **1989.** *Karst Geomorphology and Hydrology*. London : Unwin Hyman, 1989. pág. 601p.
- . **2007.** *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, 2007. pág. 562p. : il.
- Gandallah, Mamdouh R. 2005.** *Applied seismology: a comprehensive guide to seismic theory and application*. Tulsa : PennWell Corporation, 2005. 434p.
- García Gómez, Cecilia Socorro. 2005.** *El nuevo enfoque integral del turismo: el ecoturismo como alternativa de desarrollo sustentable en Tabasco: Los pantanos de Centla*. s.l. : Tesis de Licenciatura (Licenciado en Relaciones Internacionales) Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, 2005. pág. 129p. : il.
- García, Enriqueta. 1988.** *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. 1988. pág. 217p.
- García, Pedro, Sour, Francisco y Montellano, Marisol, [ed.]. 2010.** *Paleontología*. Ciudad Universitaria : Las prensas de ciencias, 2010. pág. 246p.
- Gerstenhauer, A. 1960.** Der tropische Kegellarst in Tabasco (México). *Zeitschrift fuer Geomorphologie, Supplementband 2: Karstmorphologie*. Frankfurt : s.n., 1960, págs. 22-48pp.
- Gobierno del Estado de Tabasco. 2007.** *Fiestas y Ferias*. [En línea] 2007. http://www.tabasco.gob.mx/estado/cultura_ferias.php.
- . **2007.** Aspectos Geográficos del Estado. *Tipo de Fauna*. [En línea] 2007. <http://www.tabasco.gob.mx/estado/geo-fauna.php>.
- . **2007.** Rutas Turísticas. *Aventura en la Sierra*. [En línea] 2007. <http://www.tabasco.gob.mx/turismo/rutsierra.php>.

- Gobierno del Estado de Tabasco. Secretaría de Planeación. 2009.** Tercer Informe de Gobierno. [En línea] 2009. http://seplan.tabasco.gob.mx/seplanet/subsria_planeacion/3er_informe/3er_informe.php.
- Gobierno Municipal de Tacotalpa. 2010.** Plan Municipal de Desarrollo 2010-2011. [En línea] 2010. <http://www.tacotalpa.gob.mx/transparencia2/dmdocuments/General/PLANMUNICIPALTACOTALPA.pdf>.
- Gobierno Municipal de Teapa. 2010.** Primer Informe de Gobierno. [En línea] 2010. http://www.transparenciateapa.gob.mx/I_Informe_de_Gobierno.pdf.
- Gombert, P. (1995) 2008.** Approche théorique simplifiée de la dissolution karstique. *Karstología*, 24, 41-51. [aut. libro] Mateo Gutiérrez Elorza. *Geomorfología*. Madrid : Pearson Educación, S.A. Prentice Hall, (1995) 2008, pág. 209.
- Google Inc. 2011.** Google Earth. [En línea] 2011. <http://www.google.com/earth/index.html>.
- Goway Travel. 2010.** Goway Travel. *Vietnam- a photographers delight!* [En línea] 2010. <http://goway.com/blog/2010/04/26/vietnam-a-photographers-delight/>.
- Gracia Prieto, F. J. 1991.** Criterios de clasificación morfométrica de campos de dolinas. *Cuaternario y Geomorfología*. Cádiz : s.n., 1991, Vol. 5, págs. 65-76pp.
- Gracia, F. J., Gutiérrez, F. y Gutiérrez, M. 1996.** Los poljes de la región de Layna (Cordillera Ibérica Noroccidental). *Cuaternario y Geomorfología*. 1996, Vol. 10, págs. 33-45pp.
- . (2002) 2008. Origin and evolution of the Gallocanta polje. [aut. libro] Mateo Gutiérrez Elorza. *Geomorfología*. Madrid : Pearson Educación, S.A. Prentice Hall, (2002) 2008, pág. 196.
- Gunn, J., [ed.]. 2004.** *Encyclopedia of caves and karst science*. New York : Fitzroy Dearborn, 2004. pág. 807 p. : il.
- . (2004b) 2008. Valleys in Karst. [aut. libro] Mateo Gutiérrez Elorza. *Geomorfología*. Madrid : Pearson Educación, S.A. Prentice Hall, (2004b) 2008, pág. 200.
- Gunning, Paul. 2011.** Science Photo Library. *Calcite crystals, SEM*. [En línea] 2011. [http://www.sciencephoto.com/images/imagePopUpDetails.html?pop=1&id=670016333&pviewid=&country=67&search=calcite+AND+\(crystals,+AND+sem\)&matchtype=FUZZY](http://www.sciencephoto.com/images/imagePopUpDetails.html?pop=1&id=670016333&pviewid=&country=67&search=calcite+AND+(crystals,+AND+sem)&matchtype=FUZZY).
- Gutiérrez del Campo, Marta. 2010.** Biología y Geología "Amor de Dios" Valladolid. *Tema 3: Pliegues y Fallas*. [En línea] 2010. <http://matragut.wordpress.com/2010/11/04/pliegues-y-fallas/>.
- Gutiérrez Elorza, Mateo. 2008.** *Geomorfología*. Madrid : Pearson Educación, S.A. Prentice Hall, 2008. pág. 898p.
- Gutiérrez, M. y Peña, J. L. (1979a) 2008.** El Karst de Villar del Cobo (Sierra de Albarracín). [aut. libro] Mateo Gutiérrez Elorza. *Geomorfología*. Madrid : Pearson Educación, S.A. Prentice Hall, (1979a) 2008, pág. 186.
- Halliday, W. R. (2004) 2008.** Pseudokarst. [aut. libro] Mateo Gutiérrez Elorza. *Geomorfología*. Madrid : Pearson Educación, S.A. Prentice Hall, (2004) 2008, pág. 177.
- Haryono, Eko y Day, Mick. 2004.** Landform differentiation within the Gunung Kidul Kegelkarst, Java, Indonesia. *Journal of Cave and Karst Studies*. 2004, Vol. 66 No. 2, págs. 62-69pp.
- Huggett, Richard John. 2011.** *Fundamentals of Geomorphology*. Third edition. Abingdon : Routledge, 2011. pág. 516p.
- ikankecil3. 2011.** Panoramio from Google Inc. *Fotos por ikankecil3*. [En línea] 2011. <http://static.panoramio.com/photos/original/48780380.jpg>.
- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. 2009.** El concreto en la obra: problemas, causas y soluciones. *Determinación del índice de rebote utilizando el dispositivo conocido como esclerómetro*. [En línea] 2009. <http://www.imcyc.com/ct2009/mar09/PROBLEMAS.pdf>.
- Instituto Nacional de Ecología. 2001.** Cambio Climático en México. *Glosario de términos en cambio climático*. [En línea] 2001. http://cambio_climatico.ine.gob.mx/glosario.html.
- . 2004. *El establecimiento de Geoparques en México: un método de análisis geográfico para la conservación de la naturaleza en el contexto del manejo de cuencas hídricas*. [ed.] Celia López Miguel. Ciudad de México : Instituto Nacional de Ecología. Dirección de Manejo Integral de Cuencas Hídricas, 2004. pág. 50p.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2009.** *Anuario estadístico del estado de Tabasco*. s.l. : Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2009.
- . **2011.** Cartografía Digital. *Ficha Técnica del Modelo Digital de Elevación LIDAR tipo Terreno*. s.l. : Departamento de Modelos Digitales de la D.G.G. y M.A., 2011.
- . **2011.** Información Geográfica del Estado de Tabasco. *Fisiografía*. [En línea] 2011. <http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/estados/tab/fisio.cfm?c=444&e=13>.
- Instituto Nacional de Tecnologías Educativas y de Formación del Profesorado. 2012.** Instituto Nacional de Tecnologías Educativas y de Formación del Profesorado. *Protocolos: Cobertura: Toma de Datos*. [En línea] 2012. http://centros5.pntic.mec.es/~marque13/globe/Web-Curso%20Globe/cobertura_toma_de_datos2.htm.
- International Union for Conservation of Nature. 2008.** *Guidelines for applying protected area management categories*. [ed.] Nigel Dudley. s.l. : International Union for Conservation of Nature, 2008. pág. 86p. : ill.
- International Union for Conservation of Nature. World Commission on Protected Areas. 1997.** *Guidelines for Cave and Karst Protection*. [ed.] John Watson, y otros. s.l. : International Union for Conservation of Nature, 1997. pág. 53p.
- International Union for Conservation of Nature. World Heritage Convention. 2008.** *World Heritage Cave and Karst*. s.l. : International Union for Conservation of Nature, 2008. pág. 57p.
- Irastorza Vaca, Pedro. 2006.** *Integración de la Ecología del Paisaje en la Planificación Territorial. Aplicación a la Comunidad de Madrid*. Madrid : Tesis Doctoral (Ingeniero de Montes) Universidad Politécnica de Madrid, 2006. pág. 274p.
- Islas Tenorio, Juan José, y otros. 2005.** Carta Geológico-Minera Villahermosa E15-8 1:250000. [En línea] 2005. http://portaljsgm.gob.mx/cartas_impresas/productos/cartas/cartas250/geologia/pdf/106_E15-8_GM.pdf.
- IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2007.** Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo*. [En línea] 2007. Roma. <http://www.fao.org/docrep/011/a0510s/a0510s00.htm>.
- Izquierdo, Mario. 2012.** Micropaleontología. *Familia Miliolidae*. [En línea] 2012. http://www.geologia.co.uk/www/apuntes_practicas.php?page=microp_tema6.php%23miliolidae&area=mp.
- Jennings, J. N. (1985) 2008.** Karst Geomorphology. [aut. libro] Mateo Gutiérrez Elorza. *Geomorfología*. Madrid : Pearson Educación, S.A. Prentice Hall, (1985) 2008, pág. 180.
- . **(1982) 2007.** Karst of Northeastern Queensland Reconsidered. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (1982) 2007, pág. 371.
- Junta de Andalucía. 2006.** Geodiversidad y Patrimonio Geológico de Andalucía. Itinerario geológico por Andalucía- guía práctica de campo. *El karst subbédico*. [En línea] 2006. http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques_Tematicos/Publicaciones_Divulgacion_Y_Noticias/Documentos_Tecnicos/geodiversidad/itinerario_andalucia/karst_subbético.pdf.
- Karst Scientific Data Center. 2007.** Karst Scientific Data Center. *Karst rocky desertification in southwestern China*. [En línea] 2007. <http://www.karstdata.cn/messinfo.aspx?id=246>.
- Kendall, C.G.St.C. 2006.** Society for Sedimentary Geology. *Carbonate Classification*. [En línea] 2006. <http://sepmstrata.org/thinsections/classification.html>.
- Khang, P. (1991) 2007.** Présentation des régions karstiques du Vietnam. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (1991) 2007, pág. 369.
- Kranjc, A. (2004) 2008.** Kras, Eslovenia. [aut. libro] Mateo Gutiérrez Elorza. *Geomorfología*. Madrid : Pearson Educación, S.A. Prentice Hall, (2004) 2008, pág. 176.
- La Comunidad Petrolera. 2012.** Curso de Propiedades de la Roca Yacimiento. *Porosidad*. [En línea] 2012. <http://www.lacomunidadpetrolera.com/cursos/propiedades-de-la-roca-yacimiento/procedimientos-para-medir-la-porosidad.php>.
- Land, L. A. y Paull, C. K. (2000) 2007.** Submarine karst belt rimming the continental slope in the Straits of Florida. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (2000) 2007, pág. 369.

- Lehmann, H. (1954a) 1988.** Der tropische Kegelkarst auf den grossen Antillen. [aut. libro] William B. White. *Geomorphology and hydrology of karst terrains*. Oxford : Oxford University Press, (1954a) 1988, pág. 47.
- . **(1955) 2008.** Der tropische kegelkarst in westindien. [aut. libro] Mateo Gutiérrez Elorza. *Geomorfología*. Madrid : Pearson Educación, S.A. Prentice Hall, (1955) 2008, pág. 214.
- . **(1936) 1988.** Morphologische Studien auf Java. [aut. libro] William B. White. *Geomorphology and hydrology of karst terrains*. Oxford : Oxford University Press, (1936) 1988, pág. 46.
- Leighton, M. W. y Pendexter, C. (1962) 2007.** Carbonate rock types. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (1962) 2007, pág. 10.
- Lugo Hubp, José. 1989.** *Diccionario Geomorfológico*. Ciudad de México : Universidad Nacional Autónoma de México, 1989. pág. 337p.
- Lugo Hubp, José y Córdova Fernández de Arteaga, Carlos. 1992.** Atlas Nacional de México. *Geomorfología II*. Ciudad de México : Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geografía, 1992. Vol. IV, 3.4.
- Magurran, Anne E. 2004.** *Measuring Biological Diversity*. Oxford : Blackwell Publishing, 2004. pág. 256p.
- Martínez Martínez, César. 2004.** Asociación Española Para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra. Ciclos Biogeoquímicos. *Ciclo del Carbono*. [En línea] 2004. <http://platea.pntic.mec.es/~cmarti3/CTMA/BIOSFERA/c.htm>.
- Mateo Rodríguez, José. 1981.** *Morfología cárstica*. La Habana : Universidad de La Habana. Facultad de Geografía, 1981. pág. 310p.
- Matthews, John A. y Herbert, David T. 2008.** *Geography, a very short introduction*. New York : Oxford University Press, 2008. pág. 181p.
- McDonald. 2007.** Tower karst. *Tabasco*. [En línea] 2007. <http://towerkarst.com/id5.html>.
- México Desconocido. 2010.** Parque de la Sierra, en Tabasco. [En línea] 2010. <http://www.mexicodesconocido.com.mx/interior/index.php?p=nota&idNota=13649>.
- Miller, T. E. (1982) 2007.** Hydrochemistry, hydrology and morphology of the Caves Branch karst, Belize. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (1982) 2007, pág. 362.
- Monroe, W. H. (1968) 2007.** The karst features of northern Puerto Rico. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (1968) 2007, pág. 371.
- Moore, C. H. (2001) 2007.** Carbonate Reservoirs: Porosity, Evolution and Diagenesis in a Sequence Stratigraphic Framework. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (2001) 2007, pág. 18.
- Moreno, Claudia E. 2001.** Métodos para medir la biodiversidad. [aut. libro] Sociedad Entomológica Aragonesa. *Manuales y Tesis SEA*. Zaragoza : Sociedad Entomológica Aragonesa, 2001, Vol. 1, pág. 83p.
- Morse, J. W. y Arvidson, R. S. (2002) 2007.** The dissolution kinetics of major sedimentary carbonate minerals. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (2002) 2007, pág. 67.
- Nguyet, V. 2006.** Hydrogeological Characterisation and Groundwater Protection of Tropical Mountainous Karst areas in NW Vietnam. *V U B - Hydrologie*. Brussels : Vrije Universiteit Brussel, 2006, Vol. No. 48.
- NHK Japan Broadcasting Corporation. 1987.** The Miracle Planet. *How it was made habitable*. [En línea] 1987.
- Núñez Jiménez, Antonio, y otros. 1984.** *Cuevas y Carsos*. La Habana : Militar, 1984. pág. 431p.
- Ortíz Pérez, Mario Arturo, Siebe, Christina y Cram, Silke. (2005) 2005.** Diferenciación ecogeográfica de Tabasco. [aut. libro] J. Bueno, F. Álvarez y S. Santiago. *Biodiversidad del Estado de Tabasco*. Ciudad de México : Instituto de Biología, UNAM-CONABIO, (2005) 2005, págs. 305-322pp.

- Oxford University Press. 2010.** Karst processes and landforms. [En línea] 2010. http://www.oupcanada.com/higher_education/companion/geography/9780195425451/student_resources/study_guide/unit_44.html.
- Padilla y Sánchez, Ricardo José. 2007.** Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Ciudad de México : Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. División en Ciencias de la Tierra, 2007, Vol. Tomo LIX No. 1, págs. 19-42pp.
- Panos, V. y Stelcl, O. (1968) 2007.** Physiographic and geologic control in development of Cuban mogotes. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (1968) 2007, pág. 371.
- Pedraza Gilsanz, Javier de. 1996.** *Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones*. Madrid : Rueda, 1996. pág. 414p. : il.
- Peña Ramírez, Sven Jesús Alberto. 2012.** *Determinación Taxonómica y Diversidad del Paisaje en Karst Tropical: Parque Estatal de la Sierra de Tabasco, Municipios de Teapa y Tacotalpa, Tabasco, México*. Ciudad de México : Tesis de Licenciatura (Licenciado en Geografía) Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Filosofía y Letras, 2012. pág. 379.
- Perna, G. y Sauro, U. (1978) 2007.** Atlante delle microforme di dissoluzione carsica superficiale del Trentino e del Veneto. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (1978) 2007.
- Pham, K. (1985) 2007.** The development of karst landscapes in Vietnam. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (1985) 2007, pág. 371.
- Pitty, A. F. (1968a) 2007.** The scale and significance of solutional loss from the limestone tract of the southern Pennines, *Proceedings of the Geologist's Association*, 79(2), 153-77. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (1968a) 2007.
- Proceq USA, Inc. 2010.** Download area: SilverSchmidt. *Instrucciones de operación SilverSchmidt & Hammerlink*. [En línea] 2010. <http://www.proceq.com/es/site/downloads/silverschmidt.html>.
- que_de_risa. 2007.** Foro Coches. *Pequeñas maravillas españolas*. [En línea] 2007. <http://www.forocoches.com/foro/showthread.php?t=1321118>.
- Quinlan, J. F. (1967) 2008.** Classification of karst types: A review and synthesis emphasizing the North America literature, 1941 - 1966. [aut. libro] Mateo Gutiérrez Elorza. *Geomorfología*. Madrid : Pearson Educación, S.A. Prentice Hall, (1967) 2008, pág. 177.
- Racovita, G., Moldovan, O. y Onac, B. (2002) 2007.** Monografía carstului din Muntii Padurea Craiului. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (2002) 2007, pág. 345.
- Real Academia Española. 2011.** Diccionario de la Lengua Española. [En línea] 2011. <http://buscon.rae.es/drae/>.
- Research Institute of Geology and Mineral Resources. 2004.** *Proceedings of Trans-KARST 2004. International Transdisciplinary Conference on Development and Conservation of Karst Regions*. [ed.] Okke Batelaan, y otros. Ha Noi : Research Institute of Geology and Mineral Resources, 2004. pág. 305p.
- Richter, Andreas E. 1989.** *Manual del coleccionista de fósiles*. Barcelona : Ediciones Omega, S.A. Plató, 1989. pág. 462p.
- Salazar Conde, Erika del Carmen, y otros. 2004.** Evaluación espacial y temporal de la vegetación de la Sierra Madrigal, Tabasco, México (1973-2003). *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*. Ciudad de México : Universidad Nacional Autónoma de México, 2004, Vol. No. 54, págs. 7-23pp.
- Salomón, J. N. (2005) 2008.** La spécifité des karst tropicaux. [aut. libro] Mateo Gutiérrez Elorza. *Geomorfología*. Madrid : Pearson Educación, S.A. Prentice Hall, (2005) 2008, pág. 209.
- . (2000) 2007. Précis de karstologie. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (2000) 2007, pág. 365.

- Sanborn, Paul. 2006.** WEB.UNBC.CA University of Northern British Columbia. *Nahanni Karst*. [En línea] 2006. <http://web.unbc.ca/~sanborn/nahanni.html>.
- Santa, Cristina, M. Garnelo, María Luisa y Barbadilla, Antonio. 2012.** Departamento de Biología. Universidad Autónoma de Barcelona. *Genotipo y Fenotipo: la naturaleza dual de los organismos*. [En línea] 2012. <http://biologia.uab.es/genomica/swf/genotipo.htm>.
- Sauro, U. (2005) 2008.** Closed depressions. [aut. libro] Mateo Gutiérrez Elorza. *Geomorfología*. Madrid : Pearson Educación, S.A. Prentice Hall, (2005) 2008, pág. 196.
- Secretaría de Desarrollo Social y Protección al Ambiente. 2006.** Programa de Ordenamiento Ecológico del Estado de Tabasco. [En línea] 2006. <http://sernapam.tabasco.gob.mx/Ordenamiento/PROGRAMA%20DE%20ORDENAMIENTO%20ECOLOGICO%20DEL%20ESTADO%20DE%20TABASCO.pdf>.
- . **2006.** Programa de Ordenamiento Ecológico del Estado de Tabasco. *Tipos de vegetación y uso actual del suelo*. [En línea] 2006. <http://sernapam.tabasco.gob.mx/Ordenamiento/VEGETACION.bmp>.
- . **2006.** Programa de Ordenamiento Ecológico del Estado de Tabasco. *Modelo de Ordenamiento Ecológico del Estado de Tabasco*. [En línea] 2006. <http://sernapam.tabasco.gob.mx/Ordenamiento/MODELO%20DE%20ORDENAMIENTO.jpg>.
- . **2006.** Programa de Ordenamiento Ecológico del Estado de Tabasco. *Mapas del Programa de Ordenamiento Ecológico del Estado de Tabasco*. [En línea] 2006. <http://sernapam.tabasco.gob.mx/Ordenamiento/MAPAS%20VERSION%20WORD.doc>.
- Secretaría de Gobernación. 2010.** E-local. *Enciclopedia de los Municipios de México*. [En línea] 2010. http://www.e-local.gob.mx/wb2/ELOCAL/EMM_tabasco.
- Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental. 2009.** *Programa Sectorial de Recursos Naturales y Protección Ambiental 2007-2012*. [En línea] 2009. http://sernapam.tabasco.gob.mx/pdf/PROSEC%20SERNAPAM_Final%2010-julio-2009.pdf.
- . **2007.** Áreas Naturales Protegidas de Tabasco. *Parque Estatal, Sierra de Tabasco*. [En línea] 2007. <http://sernapam.tabasco.gob.mx/anpr03.php>.
- Serrano Cañadas, E. y Ruiz Flaño, P. 2007.** Geodiversidad: Concepto, Evaluación y Aplicación Territorial. El Caso de Tiermes Caracena (Soria). [aut. libro] Asociación de Geógrafos Españoles. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*. Madrid : s.n., 2007, Vol. No. 45, págs. 79-98pp.
- Silva Romo, Gilberto, Mendoza Rosales, Claudia Cristina y Campos Madrigal, Emiliano. 2006.** *Elementos de cartografía geológica*. Ciudad de México : Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería, 2006. pág. 292p.
- Smart, B. J. y Worthington, S. R. H. 2004.** Springs. [ed.] J. Gunn. *Encyclopedia of Caves and Karst Science*. New York : Fitzroy Dearborn, 2004, pág. 1495.
- Sociedad Peruana de Bioestadística e Investigación en Salud. 2009.** BioEstadístico. *Estadística No Paramétrica. Correlación de Spearman*. [En línea] 2009. <http://www.youtube.com/watch?v=OliVrw6kngk>.
- Spiegel, Murray R. 2009.** *Estadística*. Ciudad de México : McGraw-Hill Interamericana, 2009. pág. 577p.
- Spot Cool Stuff. 2011.** Spot Cool Stuff. *A Visit to the Chocolate Hills*. [En línea] 2011. <http://travel.spotcoolstuff.com/amazing-views/philippines-bohol/chocolate-hills>.
- Sunartadirdja, M. A. y Lehmann, H. (1960) 1978.** Der tropische Karst von Maros und Nord-Bone in SW-Celebes (Sulawesi). [aut. libro] G. A. Brook y D. C. Ford. *The origin of labyrinth and tower karst and the climatic conditions necessary for their development*. (1960) 1978, págs. 493-494pp.
- Suvires, Graciela M. 2004.** Procesos de piping en el piedemonte distal de la Precordillera Oriental, provincia de San Juan: factores y relieve. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. s.l. : Asociación Geológica Argentina, 2004, Vol. 59 No. 3, págs. 385-393pp.
- Sweeting, M. M. 1995.** *Karst in China*. New York : Springer-Verlag, 1995. pág. 265p.
- . **(1972) 2008.** Karst Landforms. [aut. libro] Mateo Gutiérrez Elorza. *Geomorfología*. Madrid : Pearson Educación, S.A. Prentice Hall, (1972) 2008, pág. 211.
- . **(1958) 2008.** The karstlands of Jamaica. [aut. libro] Mateo Gutiérrez Elorza. *Geomorfología*. Madrid : Pearson Educación, S.A. Prentice Hall, (1958) 2008, pág. 212.

- Tan, M. (1992) 2007.** Mathematical modelling of catchment morphology in the karst of Guizhou, China. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (1992) 2007, pág. 358.
- Tang, T. y Day, M. J. (2000) 2007.** Field survey and analysis of hillslopes on tower karst in Guilin, southern China. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (2000) 2007, pág. 377.
- Tarbut, Edward J. y Lutgens, Frederick K. 2005.** *Ciencias de la Tierra*. Madrid : Pearson. Prentice Hall, 2005. pág. 686p.
- The Taxonomicon & Systema Naturae 2000. 2012.** The Taxonomicon & Systema Naturae 2000. *Nerineidae*. [En línea] 2012. <http://taxonomicon.taxonomy.nl/TaxonTree.aspx?id=990660&tree=0.2&syn=1>.
- Tjia, H. D. (1969) 1988.** Slope development in tropical karst. [aut. libro] William B. White. *Geomorphology and hydrology of karst terrains*. Oxford : Oxford University Press, (1969) 1988, pág. 47.
- Trombe, F. (1952) 2008.** *Traité de Spéléologie*. [aut. libro] Mateo Gutiérrez Elorza. *Geomorfología*. Madrid : Pearson Educación, S.A. Prentice Hall, (1952) 2008, pág. 179.
- Tucker, M. E. y Wright, V. P. (1990) 2007.** Carbonate Sedimentology. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (1990) 2007, pág. 13.
- Tudela, Fernando. 1989.** *La modernización forzada del trópico. El caso de Tabasco*. s.l. : El Colegio de México, 1989. pág. 475p. Proyecto Integrado del Golfo.
- Universidad Jaime. 2001.** Estación de Climatología Aplicada. [En línea] 2001. <http://www.eca.uji.es/tropical.htm>.
- Vargas Márquez, Fernando, y otros. 2002.** *Áreas Naturales Protegidas de México con decretos estatales*. Primera. Ciudad de México : Instituto Nacional de Ecología, 2002. pág. 400p. Vol. 2.
- Viles, H. (1984) 2007.** Biokarst: review and prospect. *Progress in Physical Geography*, 8(4), 523-42. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (1984) 2007, pág. 94.
- Waltham, A. C. y Fookes, P. G. (2003) 2007.** Engineering classification of karst ground conditions. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (2003) 2007, pág. 341.
- Waltham, A. C. y Hamilton-Smith, E. (2004) 2004.** Ha Long Bay, Vietnam. [ed.] J. Gunn. *Encyclopedia of caves and karst science*. New York : Fitzroy Dearborn, (2004) 2004, pág. 855.
- Waltham, Tony. 2008.** Fengcong, fenglin, cone karst and tower karst. *Cave and Karst Science*. 2008, Vol. 35 No. 3, págs. 77-88pp.
- . (2004) 2004. Tower Karst Photo. [ed.] J. Gunn. *Encyclopedia of caves and karst science*. New York : Fitzroy Dearborn, (2004) 2004, pág. 1573.
- Webb, S. y Glading, P. 1998.** Limestone Pavement Conservation. *Geology and geomorphology*. [En línea] 1998. <http://www.limestone-pavements.org.uk/geology.html>.
- White, William B. 1988.** *Geomorphology and hydrology of karst terrains*. Oxford : Oxford University Press, 1988. pág. 464p.
- Whittaker, R. H. (1972) 2001.** Evolution and measurement of species diversity. [aut. libro] Claudia E. Moreno. *Métodos para medir la biodiversidad*. Zaragoza : Sociedad Entomológica Aragonesa, (1972) 2001, Vol. 1, pág. 83p.
- Williams y White. (1971;1988) 2004.** Illustrating morphometric analysis of karst with examples from New Guinea; Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains. [aut. libro] Eko Haryono y Mick Day. *Landform differentiation within the Gunung Kidul Kegelkarst, Java, Indonesia*. (1971;1988) 2004, Vol. 66 No. 2, pág. 65.
- Williams, P. W. (1987) 2007.** Geomorphic inheritance and the development of tower karst. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (1987) 2007, pág. 374.
- . (1993) 2007. Karst Terrains: Environmental Changes and Human Impacts. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. (1993) 2007, pág. 351.

- . **(1966) 1996.** Limestone pavements with special references to western Ireland. [aut. libro] Javier de Pedraza Gilsanz. *Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones*. Madrid : Rueda, (1966) 1996, pág. 334.
- . **1972.** Morphometric Analysis of Polygonal Karst in New Guinea. *Geological Society of America Bulletin*. 1972, Vol. 83, págs. 761-796pp.
- . **(2004a) 2007.** Polygonal karst and paleokarst of the King Country, North Island, New Zealand. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (2004a) 2007, pág. 352.
- . **(1969) 2007.** The geomorphic effects of groundwater. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (1969) 2007, pág. 341.
- Wissmann, H. (1954) 1960.** Der Karst in den humiden und sommerheiben Gebieten Ostasiens. [aut. libro] A. Gerstenhauer. *Der tropische Kegelkarst in Tabasco (México)*. Frankfurt : s.n., (1954) 1960, pág. 35.
- Xiong, K. (1992) 2007.** Morphometry and evolution of fenglin karst in the Shuicheng area, western Guizhou, China. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (1992) 2007, pág. 376.
- Yuan, Daoxian. 1986.** New observations on tower karst. [ed.] V. Gardiner. *International Geomorphology 1986*. Chichester : John Wiley & Sons, 1986, Vols. Proceedings of 1st International Conference on Geomorphology, Part II, págs. 1109-1123pp.
- Zhang, D. (1997) 2007.** Contemporary karst solution processes on the Tibetan Plateau. *Mountain Research and Development*, 17(2), 135-44. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (1997) 2007, pág. 81.
- Zhu, Xuewen. (1988) 2007.** Guilin Karst. [aut. libro] Derek Ford y Paul Williams. *Karst Hidrogeology and Geomorphology*. s.l. : J. Wiley & Sons, (1988) 2007, pág. 394.
- Zhu, Xuewen y Chen, Weihai. 2006.** Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers 4(1). *Tiankengs in the karst of China*. [En línea] 2006. http://www.speleogenesis.info/archive/print_save.php?Type=publication&PubID=3290.
- Zunino, Mario y Zullini, Aldo. 2003.** *Biogeografía. La dimensión espacial de la evolución*. [trad.] Marcela Pimentel. Ciudad de México : Fondo de Cultura Económica, 2003. pág. 359p.

(ISO 690)

8. ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | | | |
|---|-----|---|------------------|
| <i>Abundancia</i> | 289 | <i>cascada constructora</i> | 98 |
| <i>Abundancia relativa</i> | 289 | <i>clint</i> | 81 |
| <i>agradación</i> | 98 | <i>cockpit</i> | 86 |
| <i>agresividad del agua (karstificación)</i> | 71 | <i>cockpit karst</i> | 90, 91, 116, 117 |
| <i>agrupaciones de dolinas</i> | 90 | <i>coeficiente de escurrimiento</i> | 27 |
| <i>Agrupamiento Simple</i> | 291 | <i>Coeficiente de Similitud de Jaccard</i> | 290 |
| <i>aluvial</i> | 19 | <i>colapso</i> | 86 |
| <i>anticlinal</i> | 69 | <i>colina kárstica residual</i> | 106, 110 |
| <i>aplanamiento por corrosión</i> | 107 | <i>Composición</i> | 289 |
| <i>árbol de máxima conectividad de riqueza</i> <i>específica</i> | 310 | <i>comunidad</i> | 286 |
| <i>arcilla caolinítica</i> | 25 | <i>cone karst</i> | 114 |
| <i>área de amortiguamiento</i> | 311 | <i>cono</i> | 112 |
| <i>Área de mayor diversidad alfa específica</i> | 291 | <i>kegel, cone</i> | 111 |
| <i>Área de mayor diversidad beta específica</i> | 291 | <i>conservación</i> | 9 |
| <i>Área de mayor riqueza específica</i> | 291 | <i>conservación ambiental</i> | 9 |
| <i>área de protección de recursos naturales</i> | 282 | <i>contacto geológico</i> | 66 |
| <i>Área mínima de representatividad</i> <i>específica</i> | 290 | <i>corrasión</i> | 75 |
| <i>Área mínima representativa de riqueza</i> <i>específica</i> | 291 | <i>correlación de Spearman</i> | 148 |
| <i>área natural protegida</i> | 11 | <i>corrosión por enfriamiento</i> | 72 |
| <i>área núcleo</i> | 311 | <i>cortical</i> | 67 |
| <i>área protegida con uso sustentable de los</i> <i>recursos naturales</i> | 281 | <i>cryptokarst</i> | 56 |
| <i>área silvestre</i> | 281 | <i>cúpula</i> | 112 |
| <i>aspecto geomorfológico</i> | 185 | <i>kuppel, dome</i> | 111 |
| <i>barlovento</i> | 112 | <i>densidad kernel</i> | 144 |
| <i>biohermo</i> | 60 | <i>denudación disolutiva</i> | 73 |
| <i>biokarst</i> | 75 | <i>depósito coluvial</i> | 33 |
| <i>biostromo</i> | 60 | <i>desarrollo sustentable</i> | 10 |
| <i>bogaz</i> | 81 | <i>diaclasa</i> | 66 |
| <i>brecha</i> | 67 | <i>diaclasa maestra</i> | 67 |
| <i>cabalgamiento</i> | 67 | <i>diagénesis</i> | 63 |
| <i>calcreta</i> | 60 | <i>diapiro</i> | 55 |
| <i>caliche</i> | 60 | <i>difusión</i> | 70 |
| <i>caliza</i> | 57 | <i>disconformidad</i> | 61 |
| <i>campo de dolinas</i> | 90 | <i>disolución</i> | 70 |
| <i>campos de lapiaz</i> | 80 | <i>disolución máxima potencial</i> | 74 |
| <i>canícula</i> | 29 | <i>disolución por mezcla</i> | 72 |
| <i>cañón</i> | 97 | <i>dispersión</i> | 165 |
| <i>carso cónico</i> | 114 | <i>Diversidad</i> | |
| <i>carso cúpulas</i> | 114 | <i>Alfa</i> | 288 |
| <i>carso de torres</i> | 114 | <i>Beta</i> | 288 |
| | | <i>Gamma</i> | 289 |
| | | <i>Diversidad Gamma de Schluter y Ricklefs</i> | 290 |
| | | <i>diversidad geológica</i> | 286 |
| | | <i>diversidad geomorfológica</i> | 286 |
| | | <i>dolina</i> | 24, 56, 86 |
| | | <i>dolina de las zonas templadas</i> | 86 |



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

| | | | |
|--|---------------|---|---------------|
| <i>dolina en cubeta</i> | 86 | <i>fuente kárstica</i> | 98 |
| <i>dolina en embudo</i> | 86 | <i>fuente vaclusiana</i> | 98 |
| <i>dolina en pozo</i> | 86 | <i>garganta</i> | 97 |
| <i>dolomía</i> | 57 | <i>genotipo</i> | 286 |
| <i>drenaje</i> | | <i>geodiversidad</i> | 277, 286 |
| <i>anastomosado</i> | 27 | <i>esencial</i> | 287 |
| <i>meándrico</i> | 27 | <i>funcional</i> | 287 |
| <i>dureza Schmidt</i> | 65 | <i>representativa</i> | 287 |
| <i>ecología del paisaje</i> | 276 | <i>sistémica</i> | 287 |
| <i>ecosistema</i> | 286 | <i>geografía</i> | 8 |
| <i>endokarst</i> | 56 | <i>geomorfología</i> | 54 |
| <i>epikarst</i> | 91 | <i>geomorfología kárstica</i> | 54 |
| <i>erosión mecánica</i> | 73 | <i>geoparque</i> | 281 |
| <i>erosión química</i> | 73 | <i>glade</i> | 86 |
| <i>espeleotema</i> | 55 | <i>gnamma</i> | 55 |
| <i>estructura geológica de gran escala</i> | 286 | <i>graben</i> | 17, 105 |
| <i>estructura proceso-geomorfológica</i> | 286 | <i>grado de agrupamiento</i> | 113 |
| <i>euهدال</i> | 62 | <i>grado de aislamiento</i> | 113 |
| <i>evaporita</i> | 55 | <i>grado potencial de amenaza</i> | 47 |
| <i>exokarst</i> | 56 | <i>haluro</i> | 57 |
| <i>facie</i> | 18, 59 | <i>hiperkarst</i> | 56 |
| <i>falla</i> | 67 | <i>hipogénico</i> | 74 |
| <i>inversa</i> | 67 | <i>hipokarst</i> | 56 |
| <i>lateral</i> | 67 | <i>holokarst</i> | 76 |
| <i>normal</i> | 67 | <i>holotipo</i> | 215 |
| <i>transcurrente</i> | 67 | <i>homotipo</i> | 215 |
| <i>fase anhidra</i> | 55 | <i>hum</i> | 104 |
| <i>fengcong</i> | 90, 117 | <i>imagen de relieve sombreado</i> | 143 |
| <i>fenglin</i> | 117, 122 | <i>Índice de Aislamiento</i> | 310 |
| <i>fenotipo</i> | 286 | <i>Índice de Diversidad de Shannon-Wiener</i> | 289 |
| <i>fisura</i> | 81 | | 289 |
| <i>flachkarren</i> | 81 | <i>Índice de Equitatividad de Shannon-</i> | |
| <i>flexión</i> | 86 | <i>Wiener</i> | 289 |
| <i>fluviokarst</i> | 57, 76, 100 | <i>Índice de Simpson (Dominancia)</i> | 290 |
| <i>fluviokarst activo</i> | 100 | <i>jenk</i> | 144 |
| <i>fluviokarst activo de valles alógenos</i> | 101 | <i>karren</i> | 56, 80 |
| <i>fluviokarst activo de valles de cabecera</i> | | <i>karren costero</i> | 82 |
| <i>escarpada</i> | 101 | <i>karrenfeld</i> | 82 |
| <i>fluviokarst alogénico</i> | 101 | <i>karst</i> | 54 |
| <i>fluviokarst autogénico</i> | 101 | <i>karst activo</i> | 57 |
| <i>fluviokarst de valles secos</i> | 100, 101, 117 | <i>karst ahogado</i> | 109, 110 |
| <i>fluviokarst mixto</i> | 101 | <i>karst barré</i> | 57 |
| <i>fluviokarst relicto</i> | 100, 101 | <i>karst cónico</i> | 113, 114, 116 |
| <i>fluviokarst relicto autogénico</i> | 101 | <i>karst cubierto</i> | 57 |
| <i>forma coloidal</i> | 25 | <i>karst de conos</i> | 12 |
| <i>fragilidad geosistémica</i> | 47 | <i>karst de contacto</i> | 57, 98 |
| <i>fuelle intermitente</i> | 98 | <i>karst de corredores</i> | 82, 83 |

| | |
|---|-------------------|
| <i>karst de cúpulas</i> | 12, 113, 114, 116 |
| <i>karst de depresión-fengcong</i> | 117 |
| <i>karst de mogotes</i> | 114 |
| <i>karst de pináculos</i> | 82 |
| <i>karst de planicie-fenglin</i> | 117 |
| <i>karst de torre</i> | 116 |
| <i>karst de torres</i> | 12, 108, 113, 114 |
| <i>karst de valle-fengcong</i> | 117 |
| <i>karst desnudo</i> | 57 |
| <i>karst exhumado</i> | 57 |
| <i>karst interestratal</i> | 57 |
| <i>karst laberíntico</i> | 82, 83 |
| <i>karst poligonal</i> | 89, 90, 91, 116 |
| <i>karst rejuvenecido</i> | 107, 110 |
| <i>karst relicto</i> | 57 |
| <i>karst residual</i> | 83, 122 |
| <i>karst ruiforme</i> | 82 |
| <i>karst sumergido</i> | 109, 110 |
| <i>karst tropical</i> | 76 |
| <i>karstificación</i> | 70 |
| <i>kegelkarst</i> | 12, 114 |
| <i>kluftkarren</i> | 81 |
| <i>kuppenkarst</i> | 12 |
| <i>lapiaz</i> | 80 |
| <i>lineamiento</i> | 67 |
| <i>lixiviación</i> | 33 |
| <i>lutita</i> | 63 |
| <i>manantial</i> | 98 |
| <i>marga</i> | 63 |
| <i>Método Areográfico</i> | 291 |
| <i>modelo digital de elevación</i> | 143 |
| <i>modelo digital de elevación LIDAR tipo terreno</i> | 175 |
| <i>mogote</i> | 112 |
| <i>hügel, antler</i> | 111 |
| <i>monumento natural</i> | 282 |
| <i>monumento o característica natural</i> | 281 |
| <i>movilidad del agua (karstificación)</i> | 71 |
| <i>muesca</i> | 109, 113 |
| <i>naturaleza dual</i> | 286 |
| <i>nube de puntos</i> | 175 |
| <i>oolito</i> | 60 |
| <i>ortofoto digital</i> | 144 |
| <i>paisaje</i> | 285 |
| <i>paisaje físico-geográfico</i> | 10 |
| <i>paisaje geomorfológico</i> | 285, 286, 287 |
| <i>paisaje kárstico</i> | 10 |
| <i>paisaje kárstico de karren</i> | 81 |
| <i>paisaje protegido</i> | 281 |
| <i>paleokarst</i> | 57 |
| <i>papel</i> | |
| <i>codominante</i> | 113 |
| <i>dominante</i> | 113 |
| <i>subdominante</i> | 113 |
| <i>Parque Estatal de la Sierra de Tabasco</i> | 15 |
| <i>parque nacional</i> | 281, 282 |
| <i>patrimonio geológico</i> | 277 |
| <i>pavimento calizo</i> | 82 |
| <i>peligro</i> | 24 |
| <i>pirita</i> | 73 |
| <i>planicie de corrosión</i> | 99 |
| <i>planicie de corrosión kárstica</i> | 106, 107, 110 |
| <i>planicie kárstica marginal</i> | 99 |
| <i>plano de estratificación</i> | 61 |
| <i>plataforma epeirica</i> | 59 |
| <i>platea</i> | 83 |
| <i>plegamiento hundido</i> | 69 |
| <i>pliegue homoclinal</i> | 68 |
| <i>pocket valley</i> | 97 |
| <i>polje</i> | 103 |
| <i>polje de borde</i> | 104, 106 |
| <i>polje de nivel base</i> | 104, 105 |
| <i>polje estructural</i> | 104, 105 |
| <i>polje mixto</i> | 106 |
| <i>poljekarst compuesto</i> | 106 |
| <i>poljekarst simple</i> | 106 |
| <i>ponor</i> | 105 |
| <i>porosidad</i> | 64 |
| <i>primaria</i> | 55, 64 |
| <i>secundaria</i> | 55, 64 |
| <i>terciaria</i> | 64 |
| <i>principios emergentes de la ecología del paisaje</i> | 276 |
| <i>proceso geomorfológico</i> | 285 |
| <i>propiedades emergentes</i> | 276 |
| <i>pseudokarst</i> | 55 |
| <i>puente natural</i> | 97 |
| <i>recumbente</i> | 17 |
| <i>red de triángulos irregulares</i> | 143 |
| <i>región geomorfológica</i> | 286 |
| <i>regueros</i> | 55 |
| <i>rejuvenecimiento de la actividad erosiva</i> | 107 |
| <i>relieve terrestre</i> | 285 |
| <i>reserva de la biósfera</i> | 281 |

| | | | |
|---|--------|--|---------|
| <i>reserva natural estricta</i> | 281 | <i>turm, tower</i> | 111 |
| <i>Riqueza específica</i> | 289 | <i>tower karst</i> | 114 |
| <i>rocas carbonatadas</i> | 57 | <i>travertino</i> | 63, 98 |
| <i>rosa de direcciones</i> | 148 | <i>trazo de fracturamiento</i> | 67 |
| <i>santuario</i> | 282 | <i>tropical</i> | 10 |
| <i>sinclinal</i> | 69 | <i>tufa</i> | 63 |
| <i>sinkhole</i> | 86 | <i>turmkarst</i> | 12, 114 |
| <i>sistema de denudación kárstica</i> | 74 | <i>unidad geomorfológica</i> | 110 |
| <i>alógeno</i> | 74 | <i>unidades para la evaluación de la</i> | |
| <i>autogénico</i> | 74 | <i>geodiversidad</i> | 284 |
| <i>autogénico-abierto</i> | 75 | <i>uvula</i> | 86 |
| <i>mixto</i> | 74 | <i>vadoso</i> | 89 |
| <i>sistema S-O-H</i> | 73 | <i>valle alógeno</i> | 97 |
| <i>subsistencia</i> | 87 | <i>valle ciego</i> | 97, 98 |
| <i>subtropical</i> | 10 | <i>valle de cabecera escarpada</i> | 97, 99 |
| <i>sufosión</i> | 86 | <i>valle kárstico</i> | 97 |
| <i>sulfato</i> | 57 | <i>valle primario</i> | 97 |
| <i>sumidero</i> | 97 | <i>valle seco</i> | 97, 99 |
| <i>tafoni</i> | 55 | <i>valle secundario</i> | 97 |
| <i>tasa de denudación disolutiva</i> | 73 | <i>valle semiciego</i> | 97, 98 |
| <i>tasa de denudación kárstica</i> | 73 | <i>valles de dolinas</i> | 90, 96 |
| <i>termokarst</i> | 55 | <i>valles encajonados</i> | 83 |
| <i>terra rosa</i> | 87 | <i>Valor de importancia de la especie i</i> | 292 |
| <i>terrazza</i> | 25 | <i>valores de la geodiversidad</i> | 277 |
| <i>textura porfídica</i> | 19 | <i>vientos alisios</i> | 29 |
| <i>tiankeng</i> | 89 | <i>vulcanokarst</i> | 55 |
| <i>tierra de fisuras gigantes</i> | 82, 83 | <i>zapamiento</i> | 113 |
| <i>tor</i> | 82 | <i>zona cenagosa</i> | 113 |
| <i>torre</i> | 112 | | |

9. ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Distribución del karst en México..... | 12 |
| Figura 2. Columna Estratigráfica del Parque Estatal de la Sierra de Tabasco y zona de influencia | 21 |
| Figura 3. Sección geológica A-A..... | 22 |
| Figura 4. Representación esquemática cronológica de los eventos tectónicos que afectaron las cuencas de Sierra de Chiapas y Macuspana..... | 23 |
| Figura 5. Climograma de la Estación Meteorológica Teapa | 30 |
| Figura 6. Municipios Seleccionados en Tabasco y Corredores Anexos al CBM..... | 48 |
| Figura 7. Modelo de Ordenamiento Ecológico del Estado de Tabasco | 49 |
| Figura 8. Distribución mundial de los principales afloramientos de rocas carbonatadas | 54 |
| Figura 9. El sistema kárstico integral..... | 56 |
| Figura 10. Clasificación de las rocas carbonatadas | 57 |
| Figura 11. Tipos de plataformas carbonatadas..... | 59 |
| Figura 12. Modelo compuesto de facies para ilustrar el depósito de roca caliza..... | 60 |
| Figura 13. Clasificación de rocas calizas según Dunham (1962) modificada por Embry y Klován (1971) | 61 |
| Figura 14. Clasificación de rocas calizas según Folk (1962) modificada por Kendall (2005) | 61 |
| Figura 15. Cortes litológicos de calizas características y dolomía..... | 62 |
| Figura 16. Modelos conceptuales de secuencias de depósitos carbonatados | 63 |
| Figura 17. Principales ambientes diagenéticos, cementación de calcita y dolomitización..... | 64 |
| Figura 18. Clasificación de la porosidad en rocas carbonatadas..... | 65 |
| Figura 19. Principales tipos de fallas geológicas..... | 67 |
| Figura 20. Reconocimiento de lineamientos en áreas kársticas | 68 |
| Figura 21. Elementos de los pliegues geológicos..... | 69 |
| Figura 22. Conducto de disolución alterado por una falla geológica | 69 |
| Figura 23. Principales tipos de pliegues erosionados | 69 |
| Figura 24. Pavimentos kársticos | 69 |
| Figura 25. Esquema general de la karstificación en rocas calizas | 70 |
| Figura 26. Cantidad de carbonato cálcico disuelto en función del contenido en dióxido de carbono | 71 |
| Figura 27. Corrosión por mezcla ilustrada con diversos ejemplos..... | 72 |
| Figura 28. Velocidades de disolución, en función del PH, de la calcita, dolomita y magnesita | 72 |
| Figura 29. Modelo de disolución y acreción en superficies de calcita a escala molecular | 73 |
| Figura 30. Cristal de calcita en disolución | 73 |
| Figura 31. Principales sistemas de denudación kárstica | 75 |
| Figura 32. Relación entre tasas de denudación disolutiva y porcentaje de caliza expuesta en el área de captación..... | 75 |
| Figura 33. Ciclo del carbono..... | 76 |
| Figura 34. Campo de lapiaz en Lomas Alegres 3ª Sección, Municipio de Tacotalpa, Tabasco..... | 80 |
| Figura 35. Kluftkarren mostrando clints desnudos y fisuras rellenas de pasto, Gran Bretaña | 81 |
| Figura 36. Bogaz en calizas cretácicas de los Cañones. Piedra de San Martín. Pirineo de Navarra, España..... | 81 |
| Figura 37. Karst ruiforme en Torcal de Antequera, España | 82 |
| Figura 38. Evolución idealizada de un paisaje kárstico en el que predomina la erosión lineal | 83 |
| Figura 39. Karst laberíntico en la región de Nahanni, Canadá, e Imagen de Satélite..... | 84 |
| Figura 40. Karst laberíntico en la región de Maros al suroeste de Célebes (Sulawesi), Indonesia..... | 85 |
| Figura 41. Karst laberíntico de Gunung Kidul, Java, Indonesia..... | 86 |
| Figura 42. Dolina en forma de plato sobre las calizas de Lias, Sierra de Javalambre, España..... | 87 |
| Figura 43. Diferencia morfológica entre las dolinas de las zonas templadas y los cockpits..... | 88 |
| Figura 44. Seis tipos principales de dolinas: disolución, colapso, abandonada, enterrada, de roca estratificada y sufosión..... | 88 |
| Figura 45. Vista aérea oblicua del tiankeng de Dashiwei en el karst de Leye, Guangxi, China | 89 |
| Figura 46. Plano y perfil del tiankeng de Dashiwei | 90 |



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

| | |
|---|-----|
| Figura 47. Agrupaciones de dolinas sobre carbonatos del Lias y Dogger en la región de Villar del Cobo, Cordillera Ibérica, España | 91 |
| Figura 48. Imagen de satélite de las montañas Darai en el karst poligonal de Papúa Nueva Guinea | 92 |
| Figura 49. Vista aérea oblicua del karst poligonal de la región de Cockpit, Jamaica | 93 |
| Figura 50. Imagen de satélite del karst poligonal al Este de la región de Cockpit, Jamaica | 93 |
| Figura 51. Fotografía aérea y lineamientos visibles del karst poligonal de Gunung Kidul, Indonesia | 94 |
| Figura 52. Karst poligonal de Gunung Kidul, Indonesia | 94 |
| Figura 53. Comparación de texturas de karst poligonal de diferentes paisajes kársticos..... | 95 |
| Figura 54. Karst de la meseta kárstica de Zece Hotare en Rumania | 96 |
| Figura 55. Cañón del Sumidero en Chiapas, México | 97 |
| Figura 56. Puente natural en una garganta producida por colapso de caverna, Guizhou, China...97 | |
| Figura 57. Variación en la distancia de penetración de ríos alógenos de acuerdo con la magnitud de captura, Belice, América Central | 98 |
| Figura 58. (a) Fuente vaclusiana. (b) Fuente intermitente | 99 |
| Figura 59. Valle kárstico seco, Lathkill Dale en el fluviokarst de Peak District, Inglaterra | 100 |
| Figura 60. Valles de cabecera escarpada en las márgenes de una meseta kárstica en Francia .. | 101 |
| Figura 61. Fluviokarst relicto autogénico. Sistema de valles secos en las calizas carboníferas de Derbyshire, Reino Unido | 102 |
| Figura 62. Mapa morfológico mostrando la asociación de conos kársticos con interfluvios de valles secos, a lo largo de suelos donde se presentan depresiones kársticas | 103 |
| Figura 63. Típico polje de las regiones kársticas de Guizhou, China..... | 104 |
| Figura 64. Tipos fundamentales de Poljes | 105 |
| Figura 65. Tierras bajas de Gort, extensa planicie de corrosión kárstica de nivel base sobre calizas plegadas del Carbonífero, al oeste de Irlanda | 107 |
| Figura 66. Neodesarrollo de karst poligonal por rejuvenecimiento de karst de torres | 108 |
| Figura 67. Planicie de corrosión kárstica antigua con colinas residuales en la meseta de Guizhou, China, a 1200 m sobre el nivel del mar | 109 |
| Figura 68. Karst de torres parcialmente sumergido, Bahía de Ha Long, Vietnam..... | 110 |
| Figura 69. Ejemplos de variantes asimétricas de colinas kársticas residuales..... | 111 |
| Figura 70. Características morfológicas de las torres del karst de la Sierra de los Órganos (Cuba) | 112 |
| Figura 71. Muestras en la base de una torre kárstica en Guilin, Guangxi..... | 113 |
| Figura 72. Modelo evolutivo de una torre kárstica cerca de Guilin, ilustrando los episodios de entierro y exhumación, simultáneos a la reducción de la torre por disolución | 114 |
| Figura 73. Karst cónico (Sweeting, 1958) en el Monumento Natural Chocolate Hills, Bohol, Filipinas..... | 116 |
| Figura 74. Evolución del karst cónico (Sweeting, 1958) en Gunung Sewu, Java, Indonesia | 117 |
| Figura 75. Fenglin junto al río Lijiang, Guangxi..... | 118 |
| Figura 76. Fengcong a lo largo del horizonte de transición a karst de torre en un valle en la región de Guilin, Guangxi | 118 |
| Figura 77. Clasificación de tipos morfo-genéticos de karst en China (Zhang Zhigan, 1980a)..... | 119 |
| Figura 78. Clasificación morfo-genética del karst cubano | 119 |
| Figura 79. Tipos de karst residual | 123 |
| Figura 80. Evolución de dolina a polje | 124 |
| Figura 81. Desarrollo del fengcong y fenglin de las regiones subtropicales húmedas en la región de Guilin, China..... | 125 |
| Figura 82. Evolución kárstica en roca carbonatada, densa y levantada, protegida por una cubierta de estratos | 126 |
| Figura 83. Ajustes autogénicos y mixtos autogénico-alógenos asociados con el desarrollo de cockpit karst y karst residual | 127 |

| | |
|---|-----|
| Figura 84. Secuencia diagramática, que si es completamente desarrollada, muestra etapas de evolución del paisaje, que van de una planicie inicial, a karst de dolinas, fengcong, fenglin y de nuevo a planicie kárstica | 129 |
| Figura 85. Bloques diagramáticos ilustrando etapas seleccionadas en unidad de tiempo, en el curso de acción del modelo (KARST1) de proceso de respuesta, emulando el desarrollo del paisaje kárstico..... | 131 |
| Figura 86. Bloques diagramáticos ilustrando etapas seleccionadas en unidad de tiempo, en el curso de acción del modelo (KARST11) de proceso de respuesta, emulando el desarrollo del paisaje kárstico | 132 |
| Figura 87. El modelo CHILD corriendo para la simulación morfológica del cockpit karst | 133 |
| Figura 88. Descripción geológica del sur de Tabasco, Gerstenhauer (1960)..... | 135 |
| Figura 89. Perfil esquemático del karst en las inmediaciones de Estación Poaná y Poposá, Gerstenhauer (1960) | 135 |
| Figura 90. Descripción morfológica general, Gerstenhauer (1960) | 136 |
| Figura 91. Representación esquemática de los principales tipos de colinas kársticas, Gerstenhauer (1960) | 137 |
| Figura 92. Colina tipo C en la orilla pantanosa del karst, Gerstenhauer (1960) | 138 |
| Figura 93. Tanatocenosis de rudistas del Cretácico Superior..... | 140 |
| Figura 94. Plano topográfico de la estructura Coconá | 141 |
| Figura 95. Actitud de las capas de dolomías..... | 142 |
| Figura 96. Fotografía aérea de la estructura Coconá..... | 142 |
| Figura 97. Inclínación de las capas al norte de la estructura Coconá | 142 |
| Figura 98. Inclínación de las capas al noreste de la estructura Coconá | 142 |
| Figura 99. Modelo del origen del levantamiento "Coconá" | 142 |
| Figura 100. Fotografía aérea y lineamientos visibles del karst residual de Gunung Kidul, Indonesia | 144 |
| Figura 101. Rosa de Direcciones de Lineamientos de Interpretación Visual (Frecuencia) | 151 |
| Figura 102. Rosa de Direcciones de Lineamientos de Interpretación Visual (Longitud) | 151 |
| Figura 103. Rosas de Direcciones de Patrón de Lineamientos 1 al 8 (Frecuencia) | 152 |
| Figura 104. Rosas de Direcciones de Patrón de Lineamientos 9 al 16 (Frecuencia) | 153 |
| Figura 105. Rosas de Direcciones de Patrón de Lineamientos 17 al 19 (Frecuencia) | 154 |
| Figura 106. Rosas de Direcciones de Patrón de Lineamientos 1 al 8 (Longitud)..... | 155 |
| Figura 107. Rosas de Direcciones de Patrón de Lineamientos 9 al 16 (Longitud)..... | 156 |
| Figura 108. Rosas de Direcciones de Patrón de Lineamientos 17 al 19 (Longitud) | 157 |
| Figura 109. Rosa de Direcciones de Lineamientos Paralelos (Frecuencia) | 158 |
| Figura 110. Rosa de Direcciones de Lineamientos Entrecruzados (Frecuencia)..... | 158 |
| Figura 111. Rosa de Direcciones de Lineamientos Dendríticos (Frecuencia)..... | 159 |
| Figura 112. Rosa de Direcciones de Lineamientos Aislados (Frecuencia) | 159 |
| Figura 113. Rosa de Direcciones de Lineamientos Paralelos (Longitud) | 160 |
| Figura 114. Rosa de Direcciones de Lineamientos Entrecruzados (Longitud)..... | 160 |
| Figura 115. Rosa de Direcciones de Lineamientos Dendríticos (Longitud)..... | 161 |
| Figura 116. Rosa de Direcciones de Lineamientos Aislados (Longitud) | 161 |
| Figura 117. Relación de Orientación y Longitud de Lineamientos | 162 |
| Figura 118. Gráfica de densidad de lineamientos por patrón | 164 |
| Figura 119. Imágenes de Relieve Sombreado con azimut de iluminación de 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270 y 315° | 166 |
| Figura 120. Imagen Compuesta de Relieve Sombreado con azimut de iluminación de 0, 45, 90 y 135° | 167 |
| Figura 121. Imagen Compuesta de Relieve Sombreado con azimut de iluminación de 180, 225, 270 y 315° | 167 |
| Figura 122. Imagen Compuesta de Relieve Sombreado con realce de Contraste y Nitidez. Azimut de iluminación de 0, 45, 90 y 135° | 168 |
| Figura 123. Imagen Compuesta de Relieve Sombreado con realce de Contraste y Nitidez. Azimut de iluminación de 180, 225, 270 y 315° | 168 |

| | |
|---|-----|
| Figura 124. Descripción esquemática del orden de escurrimiento en las depresiones kársticas . | 175 |
| Figura 125. Gráfica de densidad de depresiones kársticas por patrón | 179 |
| Figura 126. Distribución del número de depresiones cerradas en función de su orden para tres áreas de karst tropical | 179 |
| Figura 127. Distribución del número de depresiones cerradas del PEST en función de su orden | 181 |
| Figura 128. Distribución del número de depresiones cerradas en función de su orden para los 4 tipos de patrón de lineamientos (agrupados) | 181 |
| Figura 129. Gráfica de densidad de colinas kársticas residuales por patrón | 188 |
| Figura 130. Muestra de superposición 2D | 193 |
| Figura 131. Muestra de superposición 3D | 193 |
| Figura 132. Número de colinas kársticas residuales del PEST en función de su tipo | 196 |
| Figura 133. Número de colinas kársticas residuales en función de su tipo para los de los 19 patrones de lineamientos..... | 197 |
| Figura 134. Número de colinas kársticas residuales en función de su tipo para los 4 tipos de patrón de lineamientos (agrupados) | 198 |
| Figura 135. Comparación de densidades de lineamientos, depresiones y colinas kársticas residuales por tipo de patrón de lineamientos | 198 |
| Figura 136. Método trigonométrico para el cálculo de altura..... | 204 |
| Figura 137. Cálculo de los ángulos a las cimas y bases de las colinas kársticas residuales..... | 204 |
| Figura 138. Comparación de fotografía de campo y modelo digital de elevación LIDAR tipo terreno de INEGI | 205 |
| Figura 139. Prueba experimental para demostrar el almacenaje natural de dióxido de carbono en roca caliza | 206 |
| Figura 140. Preparación de las muestras de campo..... | 208 |
| Figura 141. Observación de minerales superficiales y velocidad de reacción al ácido clorhídrico | 208 |
| Figura 142. Evaluación de dureza en la escala de Mohs | 208 |
| Figura 143. Muestras de campo..... | 209 |
| Figura 144. Esclerómetro y superficie de trabajo | 210 |
| Figura 145. Procedimiento de medición de la dureza Schmidt..... | 210 |
| Figura 146. Valores de medición de la dureza Schmidt | 211 |
| Figura 147. Método gravimétrico de recubrimiento para la determinación de porosidad..... | 212 |
| Figura 148. Secciones 1 y 2 de la muestra 9 | 213 |
| Figura 149. Modelo digital del <i>Karst laberíntico cónico</i> Coconá..... | 217 |
| Figura 150. Sección norte del domo calcáreo al fondo de la planicie de corrosión kárstica..... | 219 |
| Figura 151. Karst residual en el extremo noreste del conjunto laberíntico | 219 |
| Figura 152. Modelo digital del <i>Karst laberíntico cónico</i> Sierra Madrigal..... | 220 |
| Figura 153. Vertiente este del anticlinal Primavera I | 222 |
| Figura 154. Vista norte del <i>Karst laberíntico cónico</i> Sierra Madrigal desde Eureka y Belén..... | 222 |
| Figura 155. Modelo digital del <i>Karst poligonal cónico</i> San José Puyacatengo..... | 223 |
| Figura 156. Modelo digital del <i>Karst poligonal cónico</i> Vicente Guerrero (El Guanaj) | 225 |
| Figura 157. Modelo digital del <i>Fluviokarst activo cónico</i> Arroyo Cuncubac | 227 |
| Figura 158. Vista este del <i>Fluviokarst activo cónico</i> Arroyo Cuncubac (al fondo centro izquierda) | 229 |
| Figura 159. Modelo digital del <i>Fluviokarst activo cónico</i> Arroyo Libertad | 230 |
| Figura 160. Modelo digital del <i>Karst poligonal cónico</i> Cerro La Iglesia..... | 232 |
| Figura 161. Vista norte del <i>Karst poligonal cónico</i> Cerro La Iglesia (al frente derecha)..... | 234 |
| Figura 162. Modelo digital del <i>Karst residual cónico</i> Poaná | 235 |
| Figura 163. Conos representativos del <i>Karst residual cónico</i> Poaná | 237 |
| Figura 164. Torre y cono representativos del <i>Karst residual cónico</i> Poaná | 237 |
| Figura 165. Mogote y conos en Ejido Poaná | 238 |
| Figura 166. Mogote kárstico con cuevas abandonadas y estratificación masiva en Ejido Poaná . | 238 |
| Figura 167. Costras calcáreas y actividad disolutiva en la base de una torre kárstica (O8) | 239 |
| Figura 168. Paredes verticales de torres y mogotes en Dos Cerros, Ejido Poaná | 239 |
| Figura 169. Modelo digital del <i>Karst laberíntico cónico</i> Sierra Poaná Oeste | 240 |

| | |
|---|-----|
| Figura 170. Vista sur del <i>Karst laberíntico cónico</i> Sierra Poaná Oeste | 242 |
| Figura 171. Corredores kársticos y flancos residuales al norte del <i>Karst laberíntico cónico</i> Sierra Poaná Oeste | 242 |
| Figura 172. Conos kársticos residuales en el flanco norte del <i>Karst laberíntico cónico</i> Sierra Poaná Oeste..... | 243 |
| Figura 173. Planos de estratificación en el <i>Karst laberíntico cónico</i> Sierra Poaná Oeste..... | 243 |
| Figura 174. Vista longitudinal del corredor kárstico dispuesto a lo largo del polje de nivel base al norte del <i>Karst laberíntico cónico</i> Sierra Poaná Oeste | 244 |
| Figura 175. Karren en el polje de nivel base al norte del <i>Karst laberíntico cónico</i> Sierra Poaná Oeste..... | 244 |
| Figura 176. Modelo digital del <i>Karst residual cónico</i> Lomas Alegres Tercera Sección (San Antonio) | 245 |
| Figura 177. Vista noroeste del <i>Karst residual cónico</i> Lomas Alegres Tercera Sección (San Antonio) | 247 |
| Figura 178. Modelo digital del <i>Fluviokarst activo cónico</i> Arroyo Sierra Poaná | 248 |
| Figura 179. Modelo digital del <i>Karst poligonal cónico</i> Sierra Poaná Este | 250 |
| Figura 180. Vista sur del <i>Karst poligonal cónico</i> Sierra Poaná Este | 252 |
| Figura 181. Vista noreste del <i>Karst poligonal cónico</i> Sierra Poaná Este | 252 |
| Figura 182. Conos, torre y mogote representativos del <i>Karst poligonal cónico</i> Sierra Poaná Este | 253 |
| Figura 183. Vista este del <i>Karst poligonal cónico</i> Sierra Poaná Este..... | 253 |
| Figura 184. Modelo digital del <i>Karst laberíntico cónico</i> Cerro Chile | 254 |
| Figura 185. Conos representativos del <i>Karst laberíntico cónico</i> Cerro Chile | 256 |
| Figura 186. Modelo digital del <i>Karst laberíntico cónico</i> Cerro Mico..... | 257 |
| Figura 187. Vista sur del <i>Karst laberíntico cónico</i> Cerro Mico (al frente)..... | 259 |
| Figura 188. Modelo digital del <i>Karst laberíntico cónico</i> Tapijulapa | 260 |
| Figura 189. Vista suroeste del <i>Karst laberíntico cónico</i> Tapijulapa (al frente izquierda) | 262 |
| Figura 190. Modelo digital del <i>Karst poligonal cónico</i> San Manuel..... | 263 |
| Figura 191. Vista suroeste del <i>Karst poligonal cónico</i> San Manuel (al fondo) | 265 |
| Figura 192. Modelo digital del <i>Fluviokarst activo cónico</i> Arroyo Piedra Negra..... | 266 |
| Figura 193. Vista oeste del <i>Fluviokarst activo cónico</i> Arroyo Piedra Negra (al frente derecha)... | 268 |
| Figura 194. Vista de la cuenca fluviokárstica noroeste..... | 268 |
| Figura 195. Modelo digital del <i>Karst laberíntico cónico</i> Agua Escondida..... | 269 |
| Figura 196. Vista este del <i>Karst laberíntico cónico</i> Agua Escondida | 271 |
| Figura 197. Vista este del bloque laberíntico Agua Escondida | 271 |
| Figura 198. Modelo digital del <i>Karst poligonal cónico</i> Xicoténcatl..... | 272 |
| Figura 199. Vista este del <i>Karst poligonal cónico</i> Xicoténcatl (derecha)..... | 274 |
| Figura 200. Vista norte del <i>Karst poligonal cónico</i> Xicoténcatl (al fondo)..... | 274 |
| Figura 201. Enfoque integral de desarrollo sostenible con base en la diversidad geológica, biológica y cultural..... | 277 |
| Figura 202. Desarrollo de los conceptos de biodiversidad y geodiversidad..... | 277 |
| Figura 203. Mapas de geodiversidad de España y Tierras-Caracena | 284 |
| Figura 204. Representación de un área de distribución según el método areográfico en un ejemplo ficticio..... | 291 |
| Figura 205. Dendrograma de vinculación media (entre paisajes) de procesos geomorfológicos..... | 299 |
| Figura 206. Dendrograma de vinculación media (entre paisajes) de colinas kársticas residuales | 306 |

10. ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1. Riqueza litológica en el Parque Estatal de la Sierra de Tabasco y zona de influencia..... | 19 |
| Tabla 2. Distribución de los periodos de lluvias y sequía en el estado de Tabasco | 29 |
| Tabla 3. Suelos dominantes en el Parque Estatal de la Sierra de Tabasco | 34 |
| Tabla 4. Tipos de vegetación y especies representativas..... | 39 |
| Tabla 5. Asociaciones faunísticas y especies representativas | 41 |
| Tabla 6. Vocación de Uso de Suelo (POEET) | 50 |
| Tabla 7. Propiedades de los principales minerales kársticos..... | 58 |
| Tabla 8. Principales componentes de la roca caliza..... | 60 |
| Tabla 9. Terminología para los planos de estratificación (espesor y ancho de diaclasa) | 66 |
| Tabla 10. Media de la disolución potencial máxima (DMP) por tipo climático..... | 74 |
| Tabla 11. Paisajes kársticos de karren..... | 82 |
| Tabla 12. Paisajes kársticos de dolinas | 90 |
| Tabla 13. Paisajes kársticos de valle | 100 |
| Tabla 14. Paisajes kársticos de polje | 106 |
| Tabla 15. Paisajes kársticos según situación del nivel base | 110 |
| Tabla 16. Tipos fundamentales de colinas kársticas residuales de las zonas tropicales | 111 |
| Tabla 17. Paisajes de colinas kársticas residuales (enfoque morfológico) | 114 |
| Tabla 18. Ejemplares Tipo. Colinas kársticas residuales de las zonas tropicales | 115 |
| Tabla 19. Paisaje de colinas kársticas residuales (enfoque integral) | 122 |
| Tabla 20. Muestreo de agua en el sur de Tabasco, Gerstenhauer (1960) | 138 |
| Tabla 21. Coeficiente de Correlación de Spearman para las variables Orientación y Longitud de Lineamientos | 162 |
| Tabla 22. Interpretación del valor de "Rho" | 163 |
| Tabla 23. Orientaciones preferidas por tipo de patrón de lineamientos | 163 |
| Tabla 24. Coincidencias de orientaciones preferidas entre tipos de patrón de lineamientos y patrones formativos..... | 163 |
| Tabla 25. Densidad de lineamientos por patrón | 164 |
| Tabla 26. Densidad de lineamientos por tipo de patrón | 164 |
| Tabla 27. Dispersión por tipo de patrón de lineamientos | 165 |
| Tabla 28. Sensibilidad de los tipos de patrón de lineamientos a diferentes tratamientos | 165 |
| Tabla 29. Parámetros de ajuste para el algoritmo de extracción de lineamientos en PCI Geomatica 10 | 169 |
| Tabla 30. Densidad de depresiones kársticas por patrón | 177 |
| Tabla 31. Densidad de depresiones kársticas por tipo de patrón | 177 |
| Tabla 32. Informe morfométrico de las depresiones kársticas del Parque Estatal de la Sierra de Tabasco | 181 |
| Tabla 33. Informe morfométrico de las depresiones kársticas de los 19 patrones de lineamientos | 181 |
| Tabla 34. Informe morfométrico de las depresiones kársticas de los 4 tipos de patrón de lineamientos (agrupados) | 184 |
| Tabla 35. Densidad de colinas kársticas residuales por patrón..... | 188 |
| Tabla 36. Densidad de colinas kársticas residuales por tipo de patrón | 188 |
| Tabla 37. Informe morfométrico de las colinas kársticas residuales del Parque Estatal de la Sierra de Tabasco | 194 |
| Tabla 38. Informe morfométrico de las Colinas kársticas residuales de los 19 patrones de lineamientos | 194 |
| Tabla 39. Informe morfométrico de las colinas kársticas residuales de los 4 tipos de patrón de lineamientos (agrupados)..... | 196 |
| Tabla 40. Itinerario del Trabajo de Campo | 200 |
| Tabla 41. Sitios y variables de muestreo litológico | 201 |
| Tabla 42. Sitios y variables de verificación | 202 |
| Tabla 43. Sitios y variables de observación del paisaje | 203 |
| Tabla 44. Propiedades minerales y determinación litológica de las muestras de campo..... | 209 |



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

| | |
|--|-----|
| Tabla 45. Registro de datos y cálculo de la porosidad..... | 213 |
| Tabla 46. Gasterópodos y foraminíferos fósiles del <i>Karst residual cónico</i> Poaná | 214 |
| Tabla 47. Géneros de paisaje presentes dentro del área kárstica del PEST y zona de influencia | 215 |
| Tabla 48. Identificadores numéricos y textuales de los patrones de lineamientos | 216 |
| Tabla 49. Valores de la geodiversidad | 278 |
| Tabla 50. Requerimientos para la conservación del patrimonio geológico | 279 |
| Tabla 51. Figuras de geoconservación con reconocimiento nacional e internacional | 281 |
| Tabla 52. Trabajos de evaluación de geodiversidad | 283 |
| Tabla 53. Tipos de diversidad biológica y geológica con base en el nivel de organización | 286 |
| Tabla 54. Naturaleza dual de los organismos biológicos y paisajes geomorfológicos | 286 |
| Tabla 55. Clasificación de la Geodiversidad | 292 |
| Tabla 56. Tipos de geodiversidad seleccionadas para su evaluación | 292 |
| Tabla 57. Estimación de los valores de la geodiversidad | 293 |
| Tabla 58. Dimensión cuantitativa de los procesos geomorfológicos en función de su dominancia en el paisaje..... | 294 |
| Tabla 59. Riqueza proceso-geomorfológica del Parque Estatal de la Sierra de Tabasco | 294 |
| Tabla 60. Cálculos de geodiversidad alfa de procesos geomorfológicos | 294 |
| Tabla 61. Geodiversidad alfa de procesos geomorfológicos | 297 |
| Tabla 62. Matriz de presencia/ausencia de procesos geomorfológicos..... | 297 |
| Tabla 63. Matriz de distancias de procesos geomorfológicos..... | 298 |
| Tabla 64. Historial de conglomeración de procesos geomorfológicos..... | 299 |
| Tabla 65. Cálculos de geodiversidad alfa de colinas kársticas residuales | 302 |
| Tabla 66. Geodiversidad alfa de colinas kársticas residuales..... | 304 |
| Tabla 67. Matriz de presencia/ausencia de colinas kársticas residuales | 304 |
| Tabla 68. Matriz de distancias de colinas kársticas residuales | 305 |
| Tabla 69. Historial de conglomeración de colinas kársticas residuales..... | 306 |
| Tabla 70. Cálculos de geodiversidad alfa de paisajes geomorfológicos | 309 |
| Tabla 71. Geodiversidad alfa de paisajes geomorfológicos | 309 |
| Tabla 72. Aplicabilidad de propiedades emergentes para la identificación de áreas prioritarias de conservación..... | 310 |
| Tabla 73. Clases y criterios considerados para el establecimiento de las áreas emergentes y valores de importancia de la especie i | 310 |
| Tabla 74. Criterios para la construcción del árbol de máxima conectividad de riqueza específica | 310 |
| Tabla 75. Ajustes para el establecimiento de las áreas mínimas de representatividad específica | 311 |
| Tabla 76. Valores de importancia de colinas kársticas residuales y paisajes geomorfológicos.... | 316 |
| Tabla 77. Valores de la geodiversidad de los 19 paisajes geomorfológicos del PEST | 319 |
| Tabla 78. Valores de la geodiversidad del paisaje kárstico en el PEST..... | 319 |

11. ÍNDICE DE MAPAS

| | |
|--|-----|
| Mapa 1. Ubicación del Parque Estatal de la Sierra de Tabasco | 16 |
| Mapa 2. Mapa Geológico..... | 20 |
| Mapa 3. Mapa Fisiográfico-Topográfico | 26 |
| Mapa 4. Mapa Hidrográfico | 28 |
| Mapa 5. Mapa Climático, Isotermas e Isoyetas | 32 |
| Mapa 6. Mapa Edafológico | 35 |
| Mapa 7. Mapa de Uso de Suelo y Vegetación..... | 40 |
| Mapa 8. Mapa Turístico | 46 |
| Mapa 9. Mapa Hipsométrico | 78 |
| Mapa 10. Mapa de Lineamientos de Interpretación Visual con Imagen de Relieve Sombreado .. | 145 |
| Mapa 11. Mapa de Lineamientos de Interpretación Visual con Ortofoto Digital..... | 146 |
| Mapa 12. Mapa de Densidad de Lineamientos de Interpretación Visual | 147 |
| Mapa 13. Mapa de Patrones de Lineamientos | 149 |
| Mapa 14. Mapa de Tipos de Patrón de Lineamientos..... | 150 |
| Mapa 15. Mapa de Lineamientos de Extracción Automática a partir de Imágenes de Relieve Sombreado. Azimut Solar 0°, 45°, 90° y 135° | 171 |
| Mapa 16. Mapa de Lineamientos de Extracción Automática a partir de Imágenes de Relieve Sombreado. Azimut Solar 180°, 225°, 270° y 315° | 172 |
| Mapa 17. Mapa comparativo de Lineamientos de Interpretación Visual y Lineamientos de Extracción Automática (Azimut Solar 0°, 45°, 90° y 135°)..... | 173 |
| Mapa 18. Mapa comparativo de Lineamientos de Interpretación Visual y Lineamientos de Extracción Automática (Azimut Solar 180°, 225°, 270° y 315° | 174 |
| Mapa 19. Mapa de Depresiones Kársticas | 176 |
| Mapa 20. Mapa de Densidad de Depresiones Kársticas | 178 |
| Mapa 21. Mapa de Tipos de Depresiones Kársticas..... | 180 |
| Mapa 22. Mapa de Colinas Kársticas Residuales..... | 186 |
| Mapa 23. Mapa de Densidad de Colinas Kársticas Residuales | 187 |
| Mapa 24. Mapa de Pendientes | 190 |
| Mapa 25. Mapa de Aspecto Geomorfológico | 191 |
| Mapa 26. Mapa de Tipos de Colinas Kársticas Residuales | 192 |
| Mapa 27. Mapa de Sitios de Muestreo y Verificación de Campo..... | 207 |
| Mapa 28. Mapa de distribución de los Tipos y Subtipos de Paisaje Kárstico en el Parque Estatal de la Sierra de Tabasco | 275 |
| Mapa 29. Mapa de Geodiversidad Genotípica Sistémica Alfa | 300 |
| Mapa 30. Mapa de Geodiversidad Genotípica Sistémica Beta | 301 |
| Mapa 31. Mapa de Geodiversidad Fenotípica Morfológica Alfa | 307 |
| Mapa 32. Mapa de Geodiversidad Fenotípica Morfológica Beta | 308 |
| Mapa 33. Mapa de Áreas Prioritarias de Conservación de Procesos Geomorfológicos | 312 |
| Mapa 34. Mapa de Áreas Prioritarias de Conservación de Colinas Kársticas Residuales | 313 |
| Mapa 35. Mapa de Áreas Prioritarias de Conservación de Paisajes Geomorfológicos | 314 |
| Mapa 36. Mapa de Áreas Prioritarias de Conservación Intrapaisajística de Colinas Kársticas Residuales..... | 315 |
| Mapa 37. Mapa de Áreas Prioritarias de Conservación Kárstica del Parque Estatal de la Sierra de Tabasco | 318 |
| Mapa 38. Mapa de Valores de la Geodiversidad del Paisaje Kárstico en el Parque Estatal de la Sierra de Tabasco..... | 320 |
| Mapa 39. Mapa de Zonas de Manejo Natural del Parque Estatal de la Sierra de Tabasco | 327 |
| Mapa 40. Mapa de Recomendaciones de Figuras de Geoconservación en el Parque Estatal de la Sierra de Tabasco..... | 328 |



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.