



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA

**Análisis espacial y geostadístico de los suelos de la zona
henequenera con cársticas del Estado de Yucatán**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE BIÓLOGA
P R E S E N T A:
María de la Soledad Díaz Garrido

DIRECTOR DE TESIS: Dr. Francisco Bautista Zuñiga

ASESOR INTERNO: M. en C. Miguel Castillo González

México, D.F.

Febrero 2003

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A



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.

Dedico el presente trabajo:

*Al esfuerzo,
cariño y apoyo de mi mamá, quien
es un ejemplo de fortaleza*

*Al espíritu
inagotable de mi papá que aun
me acompaña*

*A la amistad,
cariño y apoyo de mis hermanos*

*Y a la compañía y afecto
de Oscar*

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por mi formación profesional.

A la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Autónoma de Yucatán

Al personal del Laboratorio de Edafología del Departamento de Manejo y Conservación de Recursos naturales tropicales de FMVZ

Al CONACYT por la beca otorgada y el financiamiento de esta investigación, a través del proyecto "Base de datos de suelos de la Península de Yucatán incluyendo la nomenclatura maya y FAO", R 31624 B, a cargo del Dr. Francisco Bautista Zúñiga.

Al Dr. Francisco Bautista por la oportunidad de trabajar en su equipo, por todo lo que aprendí de él y sobretodo por sus consejos.

Al M. en C. Miguel Castillo por la confianza, por sus enseñanzas y su amistad.

Al Biol. Ramiro Ríos por su interés y comentarios para enriquecer este trabajo.

Al Biol. Rubén Zulbarán y al M. en C. Gerardo Cruz por sus observaciones y comentarios.

A Blanca por todo lo vivido y lo que nos falta juntas.

A todos ellos gracias.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CONTENIDO

Resumen	
Capítulo I. Introducción	1
Hipótesis	3
Objetivo general	3
Objetivos específicos	3
Capítulo II. Antecedentes y fundamentos teóricos	4
Antecedentes	4
Agricultura de precisión	5
Sistemas de Información Geográfica	6
Tipos de mapas	8
Análisis multivariado	9
Geoestadística	11
Elección de propiedades para la elaboración de mapas	13
Capítulo III. Materiales y métodos	20
Descripción del sitio de estudio	20
Metodología	22
Identificación de propiedades distintivas	23
Agrupación de sitios	24
Elaboración de mapas	24
Capítulo IV. Resultados	25
Capítulo V. Discusión	42
Capítulo VI. Conclusiones	44
Capítulo VII. Bibliografía	46
Apéndice	

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Resumen

El presente estudio se realizó en la localidad de Xmatkuil, al Sur de Mérida, Yucatán, forma parte de la zona henequenera en la planicie cárstica; presenta un relieve de plano a ligeramente ondulado, con dolinas, valles, ciegos y secos, montículos de uno a dos metros de altura y numerosos afloramientos rocosos.

Se analizaron los atributos edáficos de textura, color, densidad aparente y real, contenido de carbono orgánico, capacidad de campo y profundidad de 54 subparcelas, para elaborar mapas parcelarios y agrupar las subparcelas en función de su grado de similitud.

El análisis de componentes principales reveló que los dos primeros ejes explican el 57% de la variación. Las propiedades distintivas son porcentaje de limos, contenido de carbono orgánico, densidad aparente y densidad real, en ese orden al realizar el análisis de conglomerados, se obtuvieron seis grupos.

Se identificaron tres colores de suelo: rojo (5 YR), café-rojizo (7.5 YR) y negro (10 YR). En las partes bajas del microrelieve se encuentra suelo rojo y sin rocas, ni piedras, al pie de los montículos suelos café rojizo asociado a piedras y rocas, en la parte alta de los montículos, afloramientos rocosos y escaso suelo negro.

De acuerdo a la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (1999), los grupos de suelo I y II de la parte baja del microrelieve, son Leptosoles réndzico, minerales y profundos, de rojo a café rojizo; su principal diferencia radica en la cantidad de limos. El grupo III se localiza en el pie de monte, suelo somero, Leptosol lítico. El grupo IV se identifica como Leptosol réndzico esquelético húmico/ Leptosol lítico esquelético húmico. El grupo V se localiza en el montículo, con suelo Leptosol húmico esquelético, con alto contenido de carbono orgánico, densidad real y densidad aparente bajas y mayor capacidad de campo. El grupo VI Leptosol lítico húmico se encuentra en la parte alta del microrelieve, con escasa cantidad de suelo y alto contenido de carbono orgánico.

Se concluye que los mapas parcelarios se pueden elaborar a partir de los datos de color, textura, contenido de carbono orgánico, densidad real y densidad aparente, que son propiedades de bajo costo, permitiendo la adecuada asignación de los usos productivos.

Capítulo I. Introducción

Los Leptosoles son los suelos más ampliamente distribuidos a nivel mundial, cubriendo una superficie de alrededor de 16655 millones de hectáreas (FAO/UNESCO. 1999). En México, los Leptosoles ocupan alrededor del 23.96 % de la superficie del país y en el estado de Yucatán más del 80% de la superficie. Las zonas cársticas se caracterizan por ser planicies onduladas en las que predominan suelos someros con alta heterogeneidad, que dificulta la realización de inventarios de suelos y la experimentación agrícola debido, entre otras cosas, a la escasa expresión del relieve y al costo elevado de los levantamientos.

La falta del conocimiento integro sobre aspectos pedológicos y ambientales, es la principal limitante para generar propuestas y estrategias de planeación que mejoren las actividades agrícolas y de conservación del recurso suelo. La difusión de practicas agrícolas exitosas se dificulta si no se tiene en cuenta que a cortas distancias se pueden encontrar diferentes tipos de suelo (heterogeneidad espacial). Es necesario proponer programas agrícolas, forestales y pecuarios en función de dicha heterogeneidad edáfica, teniendo como objetivo mejorar el uso de la tierra; en otras palabras la diversidad edáfica requiere diversidad de cultivos (Bautista, *et al.*, 2000a).

La heterogeneidad espacial del suelo (HES) hace referencia a medidas de variación de las diferentes unidades de suelo en un área determinada; su entendimiento comprende patrones de distribución en forma de parches, así como la identificación de sus propiedades distintivas de cada uno. Lo anterior ayuda a comprender muchos de los procesos ecológicos como son la diversidad genética, dinámica de poblaciones, competencia, depredación, reparto de hábitat, disponibilidad de alimento, estructura de las comunidades vegetales y pequeños animales. En consecuencia se podrán diseñar con mayores probabilidades de éxito, opciones de manejo de los recursos naturales que dependen de una u otra forma, de la disponibilidad del recurso suelo (Legendre y Legendre, 1983).

En la búsqueda de propiedades edáficas claves que ayuden a distinguir un suelo de otro, el análisis multivariado y espacial son dos herramientas que permiten

realizar interpretaciones que no se alcanzan con métodos estadísticos univariados. También es posible establecer grupos similares para estudios descriptivos y detectar relaciones entre una asociación de suelos con base en los valores de sus propiedades edáficas y en su localización en el espacio.

La importancia de los estudios de distribución espacial, radica en la adquisición de conocimientos sobre las correlaciones espaciales de variables físico-naturales de los recursos, como el suelo. Avances realizados por la ciencia del suelo consideran la importancia de este recurso en temas ambientales, contaminación, organización territorial, desarrollo económico sustentable, producción de alimentos y productos industriales, fijación de carbono, entre otros (Dutilleul, 1993).

La correcta interpretación de los mapas de suelos indudablemente requiere un conocimiento especializado. Tales mapas permiten la evaluación preliminar de una localidad con respecto a su mayor o menor adaptabilidad para determinados cultivos y también ayuda a deducir los lineamientos generales concernientes a la clase de manejo que pueda requerir una parcela de suelo (Cordova, 2001). Los mapas de suelo sirven igualmente para distinguir la distribución de diferentes unidades edáficas y, por lo tanto, proponer diferentes tratamientos y manejo (Teuscher, *et al.*, 1985).

Hipótesis

Si se identifica la distribución espacial de los atributos del suelo (Piedras, Rocas, Carbón Orgánico, Densidad aparente, Densidad real, Arcilla, Limo, Arena, Profundidad y Capacidad de Campo) y se establecen sus correlaciones, entonces, sobre una base analítica, se podrá proponer y aplicar un método de levantamiento de suelos en zonas cársticas del Estado de Yucatán, que sea rápido y económico.

Objetivo general

- Diseño de un método de levantamiento de suelo a nivel parcela en zonas cársticas, basado en la identificación y estimación de propiedades edáficas de bajo costo.

Objetivos específicos

- Identificación de propiedades físicas y químicas de bajo costo, que tengan un soporte analítico, para la formulación del método de levantamiento de suelos a nivel parcela.
- Exploración de la importancia del color del suelo como propiedad distintiva y conocer su soporte químico.
- Evaluación de la posibilidad de utilizar la pedregosidad y rocosidad superficial como propiedades distintivas.
- Elaboración de un mapa parcelario del área estudiada que sirva de fundamento para el diseño del método de levantamiento de suelos.

Capítulo II. Antecedentes y fundamentos teóricos

Antecedentes

Existen diversos y numerosos estudios encaminados a la elaboración de mapas en diversas áreas, a continuación se presentan algunos ejemplos:

Sparovek (1989) realizó un estudio en una selva subtropical en Brasil, donde comparó tres técnicas estadísticas dentro de las cuales se encuentra la geoestadística, con el fin de determinar la variabilidad de los parámetros utilizados y evaluar los ciclos de nutrimentos. Los parámetros evaluados fueron caída de hojas, cantidad y grado de descomposición de hojarasca, precipitación y algunos parámetros edáficos. Al hacer una comparación de las tres técnicas utilizadas observó que la que mejor representa la naturaleza del suelo fue la técnica geoestadística, ya que además de mostrar el comportamiento, se obtuvo información de aquellos puntos del terreno que no habían sido consideradas en el muestreo.

En los límites del Desierto Chihuahuense, Sommer, *et al.*, (2000) realizaron un estudio de deposición de metales traza (As, Pb y Cd) por viento, en terrenos aledaños a una presa minera, utilizando herramientas geoestadísticas para determinar su grado de afectación. Dentro de los resultados obtenidos se aprecia la elaboración de mapas que revelan el patrón de comportamiento, la ruta de dispersión y distribución espacial de dichos metales, de esta forma la misma información servirá para la remediación del sitio.

En la zona cañera de Córdoba, Veracruz, Bautista *et al.*, (1998) realizaron una clasificación numérica y la elaboración de mapas; se seleccionaron propiedades consideradas distintivas para la elaboración de mapas que fueran rápidos y baratos, dentro de ellos se encuentran las propiedades edáficas de pH, DR y textura. Con estas propiedades se podría estimar: la capacidad de intercambio catiónico con DR; drenaje interno con textura; fijación de fósforo con pH; reservas minerales con textura; riesgo de erosión con textura, entre otras.

Tapia y colaboradores (1995) realizaron un estudio de correlación de variables edáficas y desarrollo de cucurbitáceas. Para el caso de las variables de pendiente, profundidad del suelo y conductividad eléctrica, resultaron ser menos limitativas para el desarrollo de las cucurbitáceas. En este sentido se destaca la aplicación de los métodos modernos para la obtención de áreas potenciales de alta productividad, dependiendo de factores ambientales que interactúan con los probables cultivos.

Bautista *et al.*, (2002b), encontraron que el color del suelo como propiedad distintiva permite inferir estimaciones acerca del contenido de materia orgánica, Ca y P Olsen, así como el contenido total de óxidos de Si, Al y Fe. Las propiedades mineralógicas distintivas de los suelos por color son: hematita, calcita y bohemita. El color puede ser utilizado en primer instancia para distinguir los diferentes tipos de suelo, sin embargo, para aumentar la precisión es necesario analizar las propiedades químicas y mineralógicas mencionadas.

Agricultura de precisión

Los estudios de agricultura y manejo de recursos naturales se han enfocado a desarrollar, buscar, interpretar y aplicar métodos de análisis de suelo, planta y agua, que cumplan el objetivo de hacer de la producción agrícola un sistema sustentable, manejar eficientemente los recursos naturales y conservar el ambiente. Uno de los problemas que enfrenta la química analítica de las propiedades de los suelos, es la variabilidad extrema de los nutrimentos que se observa en los suelos cultivados. Para dar respuesta y solución a esta deficiencia se ha desarrollado la agricultura de precisión (Arnold, *et al.*, 1990).

La agricultura de precisión esta basada en tecnologías, como son los sistemas de información geográfica y sistemas de posición geográfica; el término agricultura de precisión se refiere al monitoreo y control electrónico aplicado a la recolección de información y su procesamiento como soporte de decisión para la ubicación espacial y temporal de insumos en la producción de cultivos. La rentabilidad de esta técnica depende en mayor medida del aumento del rendimiento más que el ahorro en insumos.

A este método de selección y planificación de suelo se le conoce también como agricultura de sitio específico. La agricultura de precisión identifica y localiza los diferentes tipos de suelo con el fin de:

- Planificar el uso de compuestos químicos, como fertilizantes y pesticidas;
- Implementar técnicas de manejo de suelo y sistemas de cultivo;
- Monitorear y registrar la producción de cultivos en un intervalo de tiempo determinado.

Para obtener la información y los conocimientos necesarios sobre el tipo de suelo se utiliza la elaboración de mapas y el uso de sensores. La elaboración de mapas requiere de un muestreo del sitio, descripción de las variables ambientales, formas de gestión del recurso, análisis de laboratorio de propiedades claves y la presentación gráfica (mapa), esto permite monitorear y designar el área de suelo que sea adecuada para el cultivo que se pretende manejar.

Con el uso de sensores se miden las propiedades, posteriormente se realiza una respuesta a la señal obtenida, por ejemplo, la aplicación de un tipo de fertilizante.

Sistemas de Información Geográfica

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es una herramienta capaz de almacenar, manejar y procesar diferentes tipos de datos, hacerlos disponibles para su análisis y presentar los resultados de manera gráfica. Una cualidad del SIG es su capacidad para almacenar la información en forma de mapas, ya sea en forma vectorial o en celdas (raster).

Los resultados obtenidos, así como todo el material interpretativo producido (mapas, tablas, listados, gráficos) son de aplicación en la planificación de:

- Opciones razonables y efectivas sobre el uso de los recursos (suelo, aire, agua, flora y fauna).
- Para el desarrollo de nuevas áreas de asentamiento y producción.
- Conversión de áreas a nuevos usos no convencionales.
- Implementación de riego u otras técnicas avanzadas.
- Incursionar y aprovechar los conocimientos sobre suelos, en otros escenarios y en relación a otras temáticas.

TESIS CON
FALLA DE ENGEN

-
- Modelos de cambio global.
 - Programas de control de degradación y desertificación.
 - Elaboración de políticas de uso sustentable.
 - Evaluación del Impacto ambiental.

La utilidad del SIG puede combinarse con otros avances tecnológicos, como son las bases de datos, para impulsar investigaciones de recuperación e interpretación con base en la diferencia de diversos atributos presentes en los recursos. Los resultados que se obtienen, así como todo material interpretativo (mapas, tablas, listados, gráficos) reflejan la potencialidad y flexibilidad que ofrecen estos medios para manipular la información de los suelos (Espadas, 2002)

En cuestiones edáficas, una interpretación acertada del SIG contribuye significativamente a comprender, predecir o estimar el potencial o limitaciones edáficas para usos específicos y precisar su comportamiento para un determinado lugar. Este panorama es de apreciable ayuda para elaborar planes o programas viables y efectivos sobre la gestión y aprovechamiento de los recursos (suelo, aire, agua, flora y fauna). A esta información pueden acceder en tiempo y forma, planificadores de diferentes profesiones y ser aplicada en la agricultura, forestación, conservación, horticultura, construcción y recreación, ya sea para el desarrollo de nuevas áreas o conversión de usos, implementación de nuevos distritos de riego, prevención y control de la erosión u otras técnicas de avanzada. El desarrollo de estas interpretaciones pone el conocimiento de los atributos de los suelos al alcance de especialistas de otras ciencias y disciplinas, así como a otro tipo de usuarios y personal interesado en el tema. En general estos análisis involucran en gran medida predicciones que son esencias de las mismas, las cuales pueden traducirse en el mejoramiento de cosechas, respuestas al manejo, riesgo de erosión, de degradación, requerimientos para riego, entre otros aspectos. El desafío es hacer mapas reales con información que sirva a una amplia gama de usuarios, así como responder a programas de cooperación interdisciplinaria para el desarrollo económico sustentable de áreas prioritarias.

Otra importante perspectiva es la de incursionar y aprovechar los conocimientos sobre los suelos, en otros escenarios y en relación a otras temáticas, ya sea integrando modelos de cambio global, o bien participando en los programas de control de degradación y desertificación, así como en la elaboración de políticas de uso sustentable ordenamiento ecológico del territorio e impacto ambiental.

Tipos de mapas

La información edáfica puede ser representada espacialmente en forma de mapas. Existen dos tipos de mapas, vectorial y raster.

Vectorial: Es la forma más común para representar los datos espaciales, emplea segmentos de líneas o puntos para identificar locaciones o atributos cartografiados (carretera, corrientes, límites, etc.). La localización se describe por pares de coordenadas, a partir de los cuales se construyen los elementos espaciales (puntos, líneas y áreas). Los objetos vectoriales no necesariamente llenan el espacio, no todas las locaciones en el espacio tienen que ser referenciadas en el modelo. Las capacidades del modelo vectorial radican en que la mayoría de las operaciones, tiene que ver con objetos, las medidas del área se calculan a partir de las coordenadas en vez de conteo de celdas, algunas operaciones más precisas (superficie, perímetro), utilizan puntos y polígonos, lo que permite desplegar los objetos almacenados y los atributos y las distintas entidades pueden ser mostradas en colores, patrones de líneas y símbolos.

Raster: La forma más simple de una estructura de datos raster implica el manejo de áreas referida a una matriz de puntos (malla de celdas) comúnmente cuadrada o rectangular. De modo general, el área de estudio es dividida por una cuadrícula regular de celdas en una secuencia específica, convencionalmente línea por línea desde la esquina superior izquierda, partiendo de que cada celda tiene un valor único para cada atributo. Asimismo, cada locación en el área de estudio corresponde a una celda en una cuadrícula y un conjunto de celdas y su valor correspondiente constituyen una capa de información. Dentro de las capacidades del modelo raster se pueden destacar el despliegue de capas en colores (cada valor representando un color), en tonos de gris, en perspectiva, así como con

leyenda; se realizan operaciones locales (producen una nueva capa de información a partir de una o más capas, recodificación, operaciones aritméticas (media, escalamiento, máximos y mínimos) y lógicas, operaciones en los vecinos locales (filtrado, pendientes y aspecto), operaciones en la vecindad local (distancia, zonas de amortiguamiento, zonas de visibilidad), operaciones en zonas (identificación, área y perímetro, distancia a los límites o fronteras y forma de la zona) (Espadas, 2002).

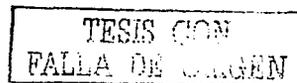
La utilidad de los mapas de suelo, se debe a que presentan las áreas donde se puede llevar al cabo la agricultura en función de las propiedades que afectan directa e indirectamente a los cultivos y al suelo.

La correcta interpretación de los mapas de suelos indudablemente requiere un conocimiento especializado. Tales mapas permiten la evaluación preliminar de una localidad con respecto a su mayor o menor adaptabilidad para determinados cultivos y ayuda también a deducir los lineamientos generales concernientes a la clase de manejo que pueda requerir una parcela de suelo. Los mapas de suelo sirven igualmente para distinguir la distribución de diferentes unidades edáficas y por lo tanto proponer diferentes tratamientos y manejo.

Análisis multivariado

El análisis multivariado provee métodos estadísticos que permiten el estudio de las relaciones entre variables y establece jerarquías en esta variabilidad. La clasificación multivariada se emplea como herramienta analítica y es capaz de extraer información de datos diversos. Además, pueden usarse para evaluar diferentes características del objeto de estudio a lo largo de gradientes espaciales y temporales (Jackson, 1993).

En el análisis de clasificación, las observaciones (que son objeto de estudio) son ubicadas en grupos, primero por las medidas de similitud, posteriormente se agrupan con algoritmos. La reducción en datos es derivada de la formación de grupos, secundariamente se calcula el grado de similitud. Los resultados son expresados en un dendrograma de dos dimensiones jerárquicas representada en un diagrama de árbol, el complejo multivariado de las relaciones entre los objetos.

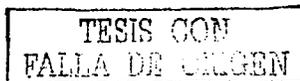


El análisis de ordenación reduce las dimensiones a un solo grupo para producir un número pequeño de variables resumidas que son de combinaciones lineales de las variables originales. Frecuentemente, la mayoría de las variaciones puede resumirse con pocos componentes, la matriz de datos puede mostrar gráficas de dos o tres dimensiones que usan los componentes en los ejes, la ordenación consiste en la ubicación de "n" puntos (observaciones) en un espacio en la dimensión "p" ("p" es el número de variables) de tal manera que el factor más importante es el diseño en la dimensión "p", que sirve para calcular la variación total (Pla, 1986).

Esto permite la visualización del diseño de distribución multidimensional y ayuda a determinar la variación de los demás componentes en cada grupo de datos. Esta técnica es apropiada cuando los niveles de variación son bajos y cuando los cambios entre las muestras son graduales. Todos los análisis de componentes principales derivan de una matriz de correlación (Herrera, 1994).

El análisis de componentes es un método estándar de análisis multivariado cuyo objetivo es encontrar combinaciones lineales de variables (ejemplo, la abundancia de especies) tales que la primera combinación tiene la máxima varianza dado que no esta correlacionada con la primera combinación lineal para la muestra de los casos (por ejemplo, sitios), la tercera combinación lineal tiene la máxima varianza, dado que no esta correlacionada con las dos primeras combinaciones, y así sucesivamente. La solución involucra encontrar los valores propios de la matriz de covarianza de las variables de abundancia de especies, usualmente después de que estas variables han sido estandarizadas (Navarro, 1998).

La similitud de objetos (muestras) o descriptores (especies) se inicia condensando la matriz básica de datos de Parámetros vs. Sitios, en la forma de una matriz cuadrada de asociación entre muestras o entre especies. En la mayoría de los casos esta matriz de asociación es simétrica. En esta matriz de asociación se hacen ordenaciones o conglomerados de los objetos muestras. Así, la estructura revelada por el análisis numérico es la matriz de asociación, y no necesariamente toda la información de la matriz de datos básica (Webster, 1990).



El análisis de conglomerados clasifica sitios, especies o variables, se trata de una clasificación intrínseca de observaciones o fenómenos, los compara con otras observaciones previas y luego se le asigna un número o nombre. Por tanto, es uno de los principales métodos usados en estudios de ecología, dado que genera un rearrreglo de tablas de datos de especies en sitios, seguido por la definición de tipos de comunidad, cada uno caracterizado por la combinación de especies distintivas (Arkley, 1991).

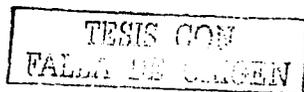
El análisis de conglomerados es una forma explícita de identificar grupos en los datos en bruto y ayuda a encontrar estructura en los datos. Sin embargo, aun si hay una estructura continua en los datos, el análisis de conglomerados puede imponer una estructura de grupo: un continuo es, entonces, participando arbitrariamente en un sistema discontinuo de tipos de clases.

Los objetivos de esta clasificación son:

- Dar información sobre la concurrencia de observaciones en un sitio (estructura interna);
- Establecer tipos de comunidad para estudios descriptivos (sin taxonomía y mapeo);
- Detectar relaciones entre comunidades y el ambiente por medio de la revisión de los grupos formados por el análisis de conglomerados con respecto a las variables ambientales (análisis externo).

Geoestadística

La importancia de los estudios de distribución espacial, hace palpable la necesidad de aplicar instrumentos útiles para adquirir conocimientos sobre las distribuciones y correlaciones espaciales de variables físico-naturales; Instrumentos estadísticos más adecuados y potentes han sido prácticamente ignorados, las teorías de procesos estocásticos o de variables regionalizadas (geoestadística), son utilizadas únicamente en las encuestas socioeconómicas y en las prospecciones mineras, a pesar de las ventajas ofrecidas por estas técnicas en la estimación de los fenómenos naturales que son muy útiles: la posibilidad para una estimación del error estadístico en los dispositivos de muestreo



sistemáticos y la teoría de la geoestadística permite una cartografía automática de los parámetros estudiados, a partir del análisis de los resultados del muestreo y de la distribución del recurso natural estudiado (determinación del variograma), además provee otras ventajas tales como proponer esquemas de muestreo propicios según los objetivos de estudio (Porta, *et al.*, 1999).

La geoestadística se caracteriza por que las estimaciones están basadas en pocas observaciones y espaciadas, además los datos siguen una distribución normal-logarítmica, permite la evaluación de la dispersión de valores, el semivariograma de un conocimiento cuantitativo de variación, como producto, se obtiene una estructura de variación del área de influencia, los métodos de muestreo son más eficientes para la cuantificación de las propiedades del suelo y el rendimiento de cultivos, la aplicación de variables regionalizadas, que son variables distribuidas continuamente con una variación geográfica (Ovalles, 1998).

La información que se desprende de un análisis geoestadístico permite estimar valores de propiedades en lugares no muestreados, proporciona un comportamiento cerca del origen, estableciendo una zonificación (Journel, 1992).

La geoestadística permite modelar esta estructura de dependencia espacial, en caso de no ser detectada, mediante el uso de variogramas, con el objeto de estimar, a través del Kriging, valores en posiciones no muestreadas (Kriging puntual) o promedios espaciales relativos a una longitud, área o volumen definido (Kriging de bloques), o por ejemplo, estimar la proporción de una región donde los niveles de concentración sobrepasan un valor límite.

El Kriging es un modelo de regresión usado con datos irregularmente espaciados en coordenados de 1, 2 o 3 dimensiones. De acuerdo con Myers (1991), en la aplicación de las técnicas de Kriging, pueden identificarse los siguientes pasos:

- Análisis exploratorio estadístico de los datos.
- Estimación y modelado de la función cualitativa de la correlación espacial.
- Uso de la función de correlación espacial para determinar una serie de ecuaciones lineales que determinan los pesos del estimador Kriging.
- Generación de valores estimados y las estimaciones de desviaciones estándar (minimizadas) asociadas (Rangel, 1997).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los resultados se utilizan como entradas para un paquete de contornos, de manera que se pueden obtener mapas con isolíneas, tanto para la variable de interés como para la desviación estándar del kriging (Myers, 1991).

La semivarianza muestral es un algoritmo matemático que relaciona el valor de las variables en el lugar cero, y el valor de la misma variable en otro punto del muestreo, realizando comparaciones en distancia. La gráfica de la semivarianza muestral y la distancia entre puntos de muestreo da origen al semivariograma muestral, el cual se obtiene a partir de una variable regionalizada, que depende de la distancia (Fernández y Rodríguez, 1994).

Elección de propiedades para la elaboración de mapas

La variabilidad del suelo es un factor limitante para predecir con exactitud el comportamiento de los suelos en cualquier posición del paisaje. Se considera las propiedades del suelo que sean permanentes (ej. morfológicas, físicas) y son menos variables que las consideradas dinámicas (ej. Químicas), esta diferencia se acentúa en la medida que los suelos bajo condiciones naturales son sometidos a un uso diferente (Ovalles, 1998).

La elección de las propiedades a analizar depende del fin que persigue el mapa a realizar, para cuestiones agrícolas una caracterización física es adecuada por ser de baja tasa de cambio, parámetros como pedregosidad, rocosidad, profundidad, textura y densidad real permiten estimar el drenaje, desarrollo radical y el soporte de especies de plantas, además su evaluación es rápida y económica. Las propiedades químicas del suelo responden al ambiente circundante, siguen ciclos y se modifican con respecto al clima y organismos presentes, la elección de propiedades claves que permitan estimar la fertilidad son de suma importancia por su costo económico y en tiempo.

Las características que se tomaron en cuenta para la elaboración del presente trabajo, se describen a continuación:

COLOR: puede ser heredado de la roca madre de donde procede el suelo o es el resultado de cambios importantes con el clima y contenido de materia orgánica. El

arreglo es por matiz o tinte, brillo o pureza e intensidad o saturación, estas variables simples que en combinación dan los colores.

- **Matiz o tinte (HUE).** Se refiere al color espectral y se relaciona con la longitud de onda de la luz dominante.
- **Brillo o pureza (VALUE),** es la tenuidad del color y es función, aproximadamente de la raíz cuadrada de la cantidad total de la luz.
- **Saturación o intensidad (CHROMA).** Es la fuerza de color espectral y aumenta conforme disminuye el gris.

El color del suelo refleja las propiedades biofísicoquímicas de relación suelo-planta y está influenciada por el contenido materia orgánica; también sirve para darse cuenta de las proporciones y clases de minerales, la condición de drenaje, aireación y porosidad (Aguilera, 1989).

La coloración del suelo depende principalmente, de la presencia de coloides orgánicos e inorgánicos, textura, estado de oxidación e hidratación de los minerales, y condiciones de drenaje en el suelo. Se puede decir que los procesos de coloración del suelo son: melanización, rubefacción, pardificación, lutefacción e inclusive decoloración o leuconización.

PEDREGOSIDAD: existen muchas discrepancias; algunos autores se refiere a la proporción relativa de piedras y fragmentos de roca de más de 25 cm y un diámetro medio menor de 1 m, que se encuentra sobre el suelo o sobre la superficie (Aguilera, 1989). Otro criterio establece que la pedregosidad se refiere a la cobertura de fragmentos gruesos (mayores de 0.2 cm) completa o parcialmente en la superficie (FAO, 1999).

Las piedras incorporadas al suelo hacen un efecto de cubierta superficial para almacenar calor y conservar la humedad, que son aprovechados por los cultivos es un práctica acostumbrada en los viñedos, en la silvicultura y en cierta clase de huertos (Teuscher, *et al.*, 1985).

ROCOSIDAD: se refiere a la proporción relativa de exposición de la roca firme en un área determinada, ya sea en afloramientos rocosos o manchas de suelos muy delgados, sobre lecho rocoso. El término rocoso se usa arbitrariamente para

suelos que tienen rocas fijas (roca firme), y el término pedregoso se usa para los suelos que tienen fragmentos rocosos sueltos (Aguilera, 1989).

TEXTURA: es una propiedad fundamental, determina muchas reacciones químicas y propiedades físicas importantes en suelos. La textura se refiere a la proporción relativa de arena, limo y arcilla presentes en el suelo donde el aspecto más sobresaliente es el tamaño de dichas partículas (Flamand, 1995).

Por su tamaño, las arcillas (diámetro menor a 2μ) son consideradas coloides, dos de sus propiedades de interés son la carga eléctrica y la superficie específica. Las arcillas están rodeadas de cargas negativas, de tal forma que atraen cationes, algunos son considerados nutrimentos esenciales para las plantas (Ortiz y Ortiz, 1990). Se entiende por limo a las partículas cuyo diámetro oscila de 0.02 a 0.002 mm y que se originan a partir de la descomposición de rocas y minerales, estas partículas tienen una consistencia suave y semejante a polvo, tienen poca tendencia a reunirse o adherirse a otras partículas. Las partículas de arena tienen de diámetro de 0.20 a 2.00 mm, tiene una baja área superficial, si se encuentra en una proporción pequeña favorece el contenido de aire y drenaje de agua a través de la columna de suelo (Aguilera, 1989).

La textura determina la cantidad de área superficial para que se lleven a cabo reacciones, en campo puede ser utilizada para hacer estimaciones burdas de otras propiedades del suelo tales como la capacidad de intercambio catiónico (a un alto contenido de arcilla mayor capacidad de intercambio catiónico), la susceptibilidad a la erosión (mayor contenido de limo mayor susceptibilidad a erosión por agua, a mayor contenido de arena mayor susceptibilidad a la erosión eólica), capacidad de retención de agua y capilaridad, entre otras propiedades.

Los minerales se incorporan por medio del intemperismo a la superficie de suelo, la importancia de estos minerales radica en que intervienen en la fertilidad natural del suelo. Mediante dicho proceso se liberan Ca, Mg, K, P y otros elementos importantes para la nutrición de las plantas (Foth, 1980).

Una buena textura es aquella que contiene cantidades iguales de partículas, si existe una fracción dominante puede generar problemas, si predominan arcilla se dificulta el manejo, si domina la arena, disminuye la disponibilidad de agua y CIC,

pobre retención de nutrientes y riesgo de erosión eólica; si dominan los limos es inestable la estructura, peligro de formación de costras, pobre germinación, baja infiltración y peligro potencial de erosión hídrica (Dijkerman, 1981).

Los minerales primarios en la fracción limo son los que se intemperizan rápidamente, así suelos con un alto contenido de limo contienen cantidades considerables de minerales fácilmente intemperizables. El tipo de material parental es importante, por ejemplo suelos con arena contienen cuarzo, que son menos fértiles que suelos ricos en cenizas volcánicas o rocas altamente básicas (con feldespatos y anfíboles). Asimismo el tiempo y la forma de intemperización de los suelos es importante, suelos jóvenes en proceso de erosión o suelos jóvenes aluviales usualmente contienen más minerales fácilmente intemperizables que suelos en terrenos superficiales. Un signo de estado joven de intemperización en suelos con áreas húmicas es la presencia de calcita (CaCO_3). Otro es la presencia de un horizonte cámbico el cual por definición contiene minerales fácilmente intemperizables. En contraste los horizontes ferrálicos representan un estado viejo de intemperización por su bajo contenido de minerales. La profundidad y la capa de rocas es otro importante criterio, suelos poco profundos encima de capa de rocas contienen más minerales comparado con suelos que tienen perfiles húmicos. (Dijkerman, 1981).

Los minerales proveen de materiales solubles que son importantes en la nutrición vegetal. Los minerales lentamente intemperizables son el cuarzo y la moscovita que se comportan como material inerte. En el trópico húmedo la descomposición es muy importante y el material soluble se pierde rápidamente. En regiones áridas dominan físicamente los materiales descompuestos y los iones solubles no se pierden en grandes cantidades.

CAPACIDAD DE CAMPO: La cantidad de agua que puede retener un suelo por capilaridad se denomina capacidad de campo. Esta característica del suelo oscila desde el 5% para los suelos muy arenosos hasta casi un 35% en suelos de textura migajón arcilloso. Puede determinarse fácilmente en un suelo de buen drenaje. Después de la lluvia o riego pesado, se cubre la superficie del suelo para reducir las pérdidas por evaporación y se dejan 2 o 3 días para permitir un drenaje libre.

Después de este tiempo la humedad en la superficie del suelo está a capacidad de campo (Teuscher, 1985).

PROFUNDIDAD DEL SUELO: se define como el espesor de material edáfico favorable para la penetración de las raíces de las plantas. Suelos profundos con buen drenaje, de textura y estructuras deseables son adecuados para la producción de cultivos. Las plantas necesitan una profundidad favorable para el buen desarrollo de sus raíces, disponer de agua y nutrimentos. La profundidad del suelo puede medirse directamente en el perfil o a través de barrenaciones (Ortiz y Ortiz, 1990).

DENSIDAD REAL: es la cantidad de masa sólida que existe por unidad de volumen. El dato de densidad real es útil para la determinación precisa de los porcentajes granulométricos (textura), este parámetro es considerado en la ley de Stokes, cuando más pesada es una partícula, más rápido puede sedimentarse. Asimismo es útil para calcular la porosidad total, la cual conduce luego a obtener la micro y macro porosidad (Gandoy, 1991). Como es una propiedad de los minerales puede ser utilizada como propiedad distintiva en Leptosoles.

Los valores de densidad real son variables y dependen de la composición del suelo. En la mayoría de los suelos minerales, su valor no excede de $2.2-2.5 \text{ gcc}^{-1}$, esto se debe a que el cuarzo, feldespatos y silicatos, sus principales constituyentes, presentan densidades comprendido dentro de ese valor. Estos valores son similares cuando existe la presencia de grandes cantidades de minerales pesados como magnetita, epidota, circón, turmalina y hornblenda, entre otros. La materia orgánica, así como algunos vidrios volcánicos que existen en el suelo, repercuten en los valores de la densidad, originando valores bajos como 1.2 a 1.5 g cc^{-1} . Por ello los horizontes orgánicos y vítricos normalmente presentan menores densidades que los horizontes minerales (Regulo, 1984).

La densidad aparente es la masa por unidad de volumen de suelo, en estado natural, y se expresa en g cc^{-1} . El valor de la densidad aparente depende de la textura, estructura, macro porosidad y micro porosidad, así como de su composición mineral y orgánica. La determinación de la densidad del suelo es

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

importante para su apreciación agronómica, debido a que de ella dependen principalmente la percolación, infiltración y aeración (Regulo, 1984).

La densidad aparente es un dato valioso que se utiliza en diferentes cálculos y en caracterización de los horizontes de suelos; las más comunes se citan a continuación.

- Capas endurecidas (una capa endurecida generalmente tiene densidades mayores a 2.0 g cc^{-1} , que provocan problemas en el desarrollo de las raíces de las plantas.
- Presencia de amorfos. En la clasificación de suelos la densidad aparente se utiliza en la caracterización de Andisoles, estos tienen densidades menores de 0.85 g cc^{-1} . generalmente tales valores se asocian con presencia de amorfos, como el alófano y con problemas de fertilización fosfórica para cultivos y para encalado.
- Grado de intemperización. El grado de intemperización se determina comparando las densidades de los horizontes superficiales con la del horizonte C.
- Cálculo del peso de una capa de suelo. Es un dato indispensable para expresar analitos en kg ha^{-1} .

La diferencia entre la densidad aparente y densidad real radica en que la primera comprende tanto las partículas como el espacio poroso del suelo, mientras que al determinar la densidad real únicamente las partículas sólidas del suelo. Por esta razón, la densidad aparente siempre es menor que la densidad real.

LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO (M.O.S.) consiste en compuestos de formación bioquímica de origen animal, vegetal y microbiana, donde se generan compuestos orgánicos de diferentes peso molecular. Las hojas, frutos, raíces, porciones leñosas, somas de animales muertos en descomposición dan origen al humus. La M.O.S. puede ser estimada por el contenido de carbono orgánico, dado que esta compuesta de carbón entre un 40 y 60% dependiendo de la composición y edad. Dentro de estos compuestos se encuentra el carbono del suelo se encuentran principalmente en la materia orgánica en forma de azúcares,

almidones, celulosa, hemicelulosa, ligninas, taninos, grasas, aceites, ceras, resinas, proteínas, etc (Teuscher, *et al.*, 1985).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO III.- Materiales y métodos

Descripción del sitio de estudio

El área de estudio se encuentra enclavada en la parte Sur del municipio de Mérida. Según el sistema de Köppen modificado por García (1973), el clima se clasifica como tropical cálido subhúmedo con lluvias en verano en casi toda su extensión.

La vegetación del área de estudio esta conformada principalmente de selvas bajas caducifolias y mediana subcaducifolia. La precipitación media anual que varia de 728.2 a 1,000 mm y una temperatura media anual que oscila de 26 a 27.3 °C (www.yuc.inegi.gob.mx). Esta constituida por árboles cuya altura oscila entre 6 y 15 m, con diámetro a la altura del pecho entre 10 y 30 cm, tiene como característica que casi todos los árboles dejan caer sus hojas durante la época más seca del año, por lo que durante los meses de febrero a mayo y en especial durante el mes de abril, la vegetación tiene color pardo amarillento o café, típico en el paisaje (Flores, 1994).

La composición edáfica del Estado de Yucatán es diversa, se encuentran presentes: Regosoles, Histosoles, Gleysoles, Solanchaks, Leptosoles, Rendzinas, Cambisoles, Luvisoles, Nitosoles y Vertisoles. Generalmente dominan suelos someros de colores que van del rojo al negro, pasando por diversas tonalidades de café. Por lo general, muestran un abundante contenido de piedras hasta de 10 y 15 centímetros de diámetro (SEMARNAP, 1998). Esta abundante pedregosidad regularmente se ve acompañada por afloramientos de coraza calcárea.

Los suelos de la Península de Yucatán reciben diferentes denominaciones, debido a la influencia cultural que aun existe entre los habitantes de la zona, a pesar de que no se cuenta con información escrita que permita entender cabalmente la nomenclatura o clasificación maya de los suelos, se sabe que esta basa en el microrelieve y utiliza propiedades distintivas tales como: pedregosidad, rocosidad, color, posición topográfica y profundidad, así como en el cultivo y vegetación establecida. Los nombres que se les asigna a los suelos se basan principalmente en el dominio de alguna característica distintiva, de esta manera a los suelos

delgados y pedregosos que corresponden a los litorales se les llama *Chaltún* y *Tsek'el*, a los suelos de color café rojizo se les conoce como *Kankab*, a los de color rojo *Chac-lu'um*, y a los de color negro o café oscuro *Box-lu'um*, *Ek-lu'um*, *Pus-lu'um* (Duch, 1988).

El área de estudio se localiza en el paralelo 20° 51' 57.36" N y el meridiano 89° 37' 23.04" W se empleó un geoposicionador modelo GPS II Plus, Marca Garmin, EPE 5 m) y comprende 1,350 m², es una parcela ubicada dentro de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, de la Universidad Autónoma de Yucatán, en la localidad de Xmatkuil, del municipio de Mérida, Yucatán (figura 1)

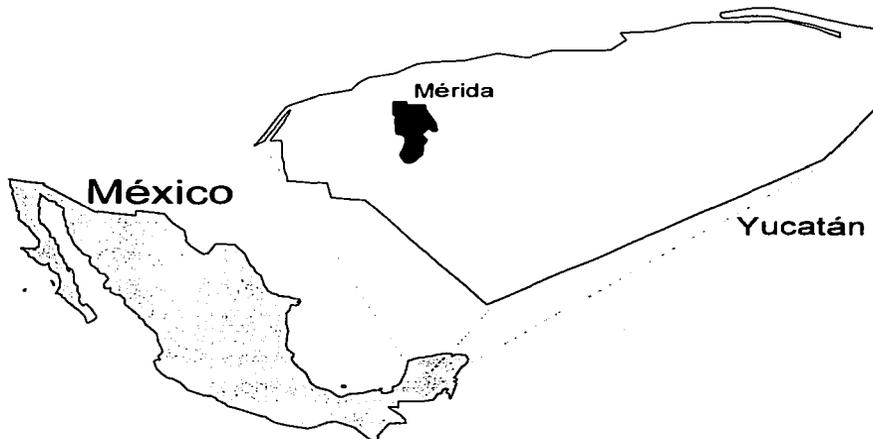


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio

La planicie cársica del mismo municipio, se caracteriza por la presencia de un relieve ligeramente ondulado, que presenta dolinas, valles ciegos y secos, con montículos de uno a dos metros de altura y numerosos afloramientos rocosos. El material parental es una capa de roca calcárea de 1.5 m de espesor, localmente conocido como laja.

Metodología.

Se muestreo la parcela experimental, obteniéndose así 54 unidades muestrales, posteriormente se les realizo el análisis de pedregosidad, rocosidad, carbono orgánico, textura, color, densidad aparente y densidad real. Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de componentes principales y de similitud para finalmente realizar los mapas con ayuda del programa SURFER (figura 2).

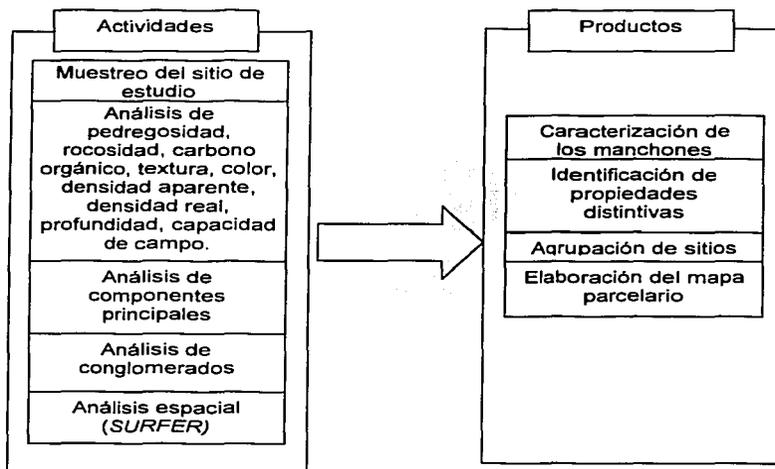


Figura 2. Metodología de trabajo

Muestreo

La parcela se dividió en 54 cuadros de 5 x 5 m (Figura 3). Se realizó un muestreo de la zona de estudio por cada cuadrante se midieron los siguientes parámetros: pedregosidad (Siebe, *et al.*, 1996), rocosidad (Siebe, *et al.*, 1996), color (cartas de

color Munsell, 1990), densidad real (método de la probeta, Gandoy, 1991), densidad aparente (Anderson, 1993), carbono orgánico por el método colorimétrico TSBF (Anderson, 1993), profundidad y capacidad de campo.

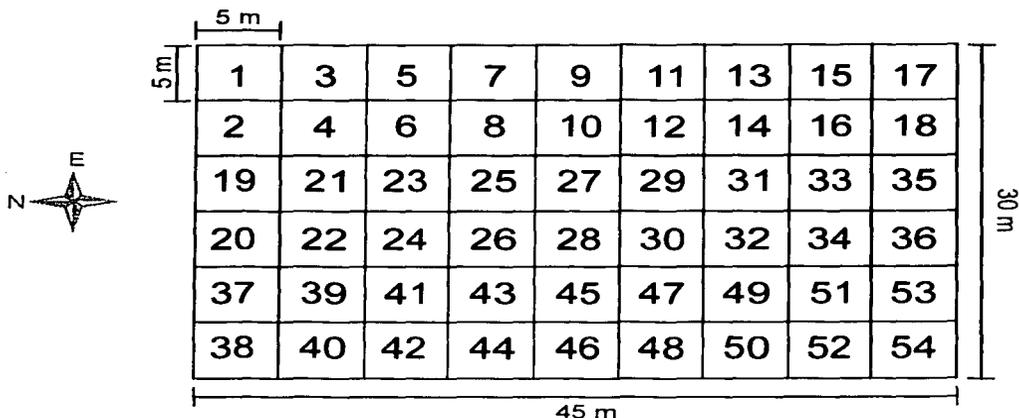


Figura 3. Distribución de subparcelas

Los datos obtenidos se agruparon por grado de similitud, cuyo valor del índice de Gower debe ser mayor a 0.625. Se creó una matriz de la cual se identificaron los componentes principales, los datos se arreglaron en conglomerados, con el fin de regionalizar las propiedades distintivas.

Identificación de propiedades distintivas

Para encontrar el patrón de relaciones entre el total de unidades experimentales, se creó una matriz de datos de nueve filas por 54 columnas, las primeras representando cada una de las características edáficas mencionadas y las segundas cada una de las unidades experimentales. Esta matriz se sometió al análisis de componentes principales (ACP), el cual permite reducir la dimensionalidad del estudio a unas cuantas variables no relacionadas

(denominadas componentes principales), cada una de las cuales contiene una parte de la variabilidad total (Afifi y Clark, 1988).

Para el cálculo de los valores propios se trabajó con una matriz de correlación y como criterio de selección de los componentes se utilizó el modelo de barra quebrada (*broken stick*) propuesto por Frontier (Legendre y Legendre, 1983; Jackson, 1993). Para calcular la correlación existente entre cada una de las variables originales y cada uno de los componentes generados, se utilizó la siguiente expresión:

$$r(jk)=x(jk) [\lambda (k)]^{1/2}$$

Donde $r(jk)$ es la correlación entre la variable original $x(j)$ y el k -ésimo componente principal; $x(jk)$ es el valor de cada uno de los vectores propios y $\lambda (k)$ es la magnitud de cada uno de los valores propios. El cuadrado de $r(jk)$ proporciona la variación explicada por componente principal para cada una de las variables (Pla, 1986).

Agrupación de sitios

Posteriormente se realizó un análisis de similitud entre las unidades experimentales, para lo cual se uso como medida de asociación el índice de Gower. La matriz de similitud generada se sometió a un análisis de clasificación jerárquica por conglomerados (cluster), en el cual se utilizó como medida de agrupación el método de ligamiento promedio no ponderado (UPGMA), expresándose los resultados en forma de dendrograma. Todos los cálculos multivariados se realizaron con el paquete MVSP (Kovach, 1995)

Elaboración de mapas

Los resultados obtenidos fueron sometidos a la técnica llamada *Kriging* por medio del programa *Surfer*, expresando así los datos en forma de mapas vectoriales; mismos que proporcionaron la base para formular el método de levantamiento de suelos en zonas cársticas de Yucatán, finalmente se realizó la comparación entre parches o grupos con los mapas de las propiedades distintivas.

El mapa raster de color se realizó con el programa *Corel Draw 9*.

CAPÍTULO IV. Resultados

Los valores obtenidos por muestra se presentan en la tabla de datos generales (apéndice, cuadro 12), posteriormente se realizó el análisis de componentes principales. Como primera observación, cabe destacar que los dos primeros componentes explican más del 57% de la variación. El primero se encuentra definido por el contenido de carbono, densidad aparente y densidad real, mientras que el contenido de limo, arcilla y rocosidad definen el segundo componente. El contenido de limo, contenido de carbono, densidad aparente y densidad real son las características edáficas que mejor explican la variación que se presenta entre las diferentes unidades, en el cuadro 1 se observa que estos cuatro parámetros tienen mayor valor en la variación explicada.

Cuadro 1. Variación explicada (V.E.) por características edáficas, de acuerdo con los primeros componentes principales (incluye la VE por componente).

Características Edáficas	C P I	C P II	VE (%)
Pedregosidad	0.4361	0.1100	54.61
Rocosidad	0.1080	0.3326	44.06
Carbono orgánico total	0.6839	0.0123	69.62
Densidad aparente	0.6586	0.0044	66.30
Densidad real	0.4905	0.0945	58.50
Arcilla	0.0952	0.4814	57.66
Limo	0.2416	0.5224	76.40
Profundidad	0.4186	0.0878	50.64
Capacidad de campo	0.4191	0.0055	42.46

De acuerdo con el análisis de componentes principal (ACP), las relaciones más evidentes se presentaron entre el contenido de carbono y capacidad de campo, contenido de carbono y densidad aparente, la densidad aparente y densidad real, así como la densidad real y contenido de limo (Cuadro 2), se tomaron los valores de la correlación mayores a 0.56.

Cuadro 2. Matriz de correlación de las características edáficas, de acuerdo con el análisis de componentes principal (ACP)

	Piedras	Rocas	COT	D.A.	D.R.	Arcilla	Limo	Prof.	C.C.
Piedras	1.00								
Rocas	-0.25	1.00							
COT	0.55	0.30	1.00						
D.A.	-0.43	-0.33	-0.61	1.00					
D.R.	-0.40	-0.06	-0.39	0.56	1.00				
Arcilla	-0.16	-0.20	-0.26	0.25	0.15	1.00			
Limo	-0.39	0.0027	-0.26	0.34	0.56	-0.40	1.00		
Prof.	-0.35	-0.32	-0.1	0.50	0.32	0.31	0.13	1.00	
C.C.	0.33	0.26	0.63	-0.33	-0.30	-0.13	-0.24	-0.29	1.00

COT= carbono orgánico total, DA= densidad aparente, DR= densidad real, Prof= profundidad, CC= capacidad de campo.

En ese orden, las propiedades del suelo permiten la formación de seis grupos mediante el análisis de conglomerados. Los grupos formados se resaltan por el engrosamiento de la línea (figura 4).

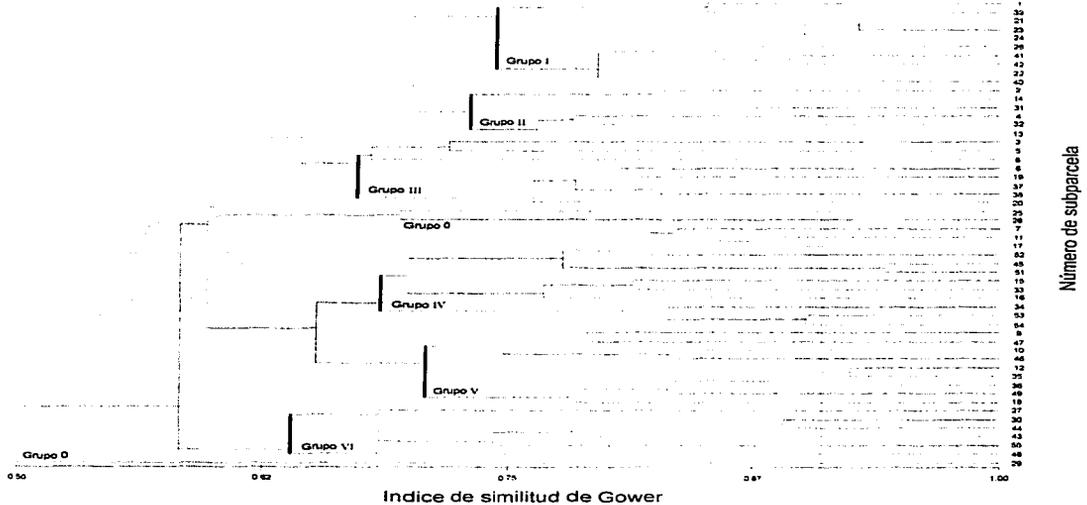


Figura 4. Análisis de conglomerados.

Dentro de este análisis de conglomerados y en consideración al índice de similitud se reconocen seis grupos, el primer grupo tiene un índice de similitud de 0.75, el segundo de 0.72, el tercer de 0.66, el cuarto de 0.68, el quinto de 0.70 y el sexto de 0.63. Existen tres subparcelas las cuales por similitud no se incluyen en ningún grupo, se les asigno el número 0 a aquellos que se consideran valores anómalos; la distribución de los grupos (en número romano) dentro de la parcela se muestra en un mapa tipo raster (figura 5).

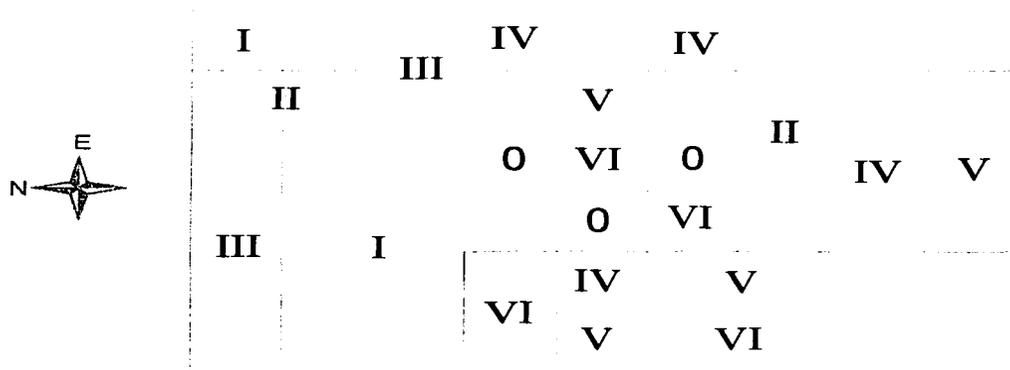


Figura 5. Mapa de distribución de grupos.

La distribución de estos grupos se comparó con la distribución de los parches por colores, (figura 6) de esta manera se encontró que el parche de color rojo ocupa el 33% de la superficie total de la parcela y se encuentra conformado por el grupo I en su mayor parte y secciones de los grupos II, III y IV (cuadro 3).

Cuadro 3. Distribución de los grupos en función del color de los parches

		Color			Unidad edáfica*
		Rojo	Café-rojizo	Negro	
Grupo	0	X	X	X	
	I	X			Leptosol réndzico
	II	X	X		Leptosol réndzico
	III	X	X		Leptosol lítico
	IV	X	X	X	Leptosol réndzico esquelético húmico/ Leptosol lítico esquelético húmico
	V		X	X	Leptosol esquelético húmico
	VI		X	X	Leptosol lítico húmico
Total de superficie		33%	50%	17%	

*De acuerdo a la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (FAO/UNESCO, 1999).

El parche de color café rojizo 50%, es el más diverso en cuanto a número de grupos que lo conforman, en su mayor parte se encuentra ocupando los grupos III y IV, acompañado de porciones de los grupos II, V y VI. El parche de color negro se encuentra en la parte central de la parcela ocupando el 17%, esta ocupado por los grupos V y VI, y una porción del grupo IV. Existen tres subparcelas con el número 0, estas no han sido asignadas a un grupo, por que el análisis de conglomerados no muestra similitudes significativas para ser integradas dentro de un grupo.

El grupo I esta conformado por 10 subparcelas (18.514% del total de la parcela), con un índice de similitud de 0.75, el color del suelo es rojo de origen mineral (densidad real $2.17 \text{ g cc}^{-1} \pm 0.12$ y densidad aparente $0.87 \text{ g cc}^{-1} \pm 0.12$). En su mayor parte poca pedregosidad y rocosidad baja, de toda la parcela se presentan los valores más bajos de carbono orgánico total (COT) $5.69\% \pm 2.53$, clase textural arcillosa, con una baja capacidad de campo, aquí se agrupan los suelos

profundos de la parcela. Comparado con el resto de la parcela, este grupo se encuentra caracterizado por contener un bajo porcentaje de fragmentos gruesos, valores altos de densidad y ser los más profundos (Cuadro 4).

Cuadro 4. Estadística descriptiva de las propiedades en el grupo I

Grupo I Subparcela	Piedras (%)	Rocas (%)	COT (%)	DA (g cc ⁻¹)	DR (g cc ⁻¹)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Prof. (cm)	CC (mL)
1	40	10	11.82	0.94	2.22	52	33	15	33	26.5
21	10	10	5.47	0.88	2.28	39	33	28	22	33.8
22	10	5	4.49	0.94	2.27	41	30	29	18	33
23	10	10	4.89	0.85	2.11	48	35	17	32	31.5
24	10	10	3.93	0.9	2.24	41	38	21	54.75	31.5
26	10	10	4.26	0.94	1.97	51	24	25	25.25	38.4
39	40	10	5.06	0.86	2.38	40	35	25	13	30.4
40	10	5	4.08	0.9	2.13	38	36	26	18	39.6
41	10	10	4.36	0.7	2.08	30	41	29	14	29.7
42	10	10	8.56	0.83	2.07	40	39	21	8.5	35.7
\bar{x}	16	9	5.69	0.87	2.17	42	34.4	23.6	23.85	33.01
s	12.64	2.10	2.53	0.07	0.12	6.63	4.85	4.92	13.45	4.01

El grupo II esta constituido por seis subparcelas (11.112% de la superficie total), con un índice de similitud de 0.72, el suelo es color rojo y café-rojizo, el contenido de piedras es variable (no se encuentra definido), no se hayan rocas, el contenido de COT es mayor que en el grupo anterior ($7.40\% \pm 3.70$), el valor de densidad es más bajo que el grupo anterior (densidad real $1.81 \text{ g cc}^{-1} \pm 0.46$, densidad aparente $0.81 \text{ g cc}^{-1} \pm 0.07$), el contenido de arcilla es mayor (clase textural Arcillosa) y el valor de CC aumenta. Este grupo pertenece al área más profunda, (Cuadro 5).

Cuadro 5. Estadística descriptiva de las propiedades en el grupo II

Grupo II Subparcela	Piedras (%)	Rocas (%)	COT (%)	DA (g cc ⁻¹)	DR (g cc ⁻¹)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Prof. (cm)	CC (mL)
2	20	10	4.98	0.9	2.2	45	26	29	29.25	37.1
4	15	10	3.88	0.84	2.57	50	29	21	21.75	29.1
13	30	10	6.57	0.74	1.54	43	25	32	21	29.4
14	20	10	6.61	0.83	1.41	67	6	27	25.25	41.7
31	20	10	7.98	0.86	1.56	52	16	32	11.5	34.3
32	15	10	14.39	0.72	1.61	47	27	29	12.25	37.9
\bar{x}	20	10	7.40	0.81	1.81	50.66	21.5	28.33	20.16	34.91
S	5.47	0	3.70	0.07	0.46	8.64	8.82	4.08	7.06	4.98

El grupo III está conformado por ocho subparcelas (14.814% de la superficie total de la parcela), con un índice de similitud de 0.66, en su mayor parte es de color café rojizo, el contenido de piedras aumenta, mientras que el contenido de rocas disminuye, el contenido de COT aumenta (9.21% \pm 2.84), clase textural arcillosa, se trata de un suelo mineral (densidad real 2.17 g cc⁻¹ \pm 0.22 y densidad aparente 0.83 g cc⁻¹ \pm 0.09), mayor capacidad de campo y es menos profundo (Cuadro 6).

Cuadro 6. Estadística descriptiva de las propiedades en el grupo III

Grupo III Subparcela	Piedras (%)	Rocas (%)	COT (%)	DA (g cc ⁻¹)	DR (g cc ⁻¹)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Prof. (cm)	CC (mL)
3	25	15	5.77	0.90	2.25	46	34	20	12.5	37.5
5	30	20	7.11	0.93	2.32	45	37	18	7.75	30.1
6	30	5	8.72	0.78	2.26	44	31	25	15.5	32.2
8	35	50	8.45	0.78	2.56	44	31	25	10.5	39.6
19	40	5	7.94	0.82	1.84	41	32	27	4.75	35.5
20	50	5	15.11	0.64	1.95	41	26	33	6.75	42.9
37	60	5	9.74	0.92	2.05	35	33	32	8.5	40
38	50	5	10.87	0.89	2.15	35	45	21	9.5	36.3
\bar{x}	40	13.75	9.21	0.83	2.17	41.37	33.62	25.12	9.46	36.76
S	12.24	15.75	2.84	0.09	0.22	4.30	5.55	5.43	3.38	4.20

El grupo IV abarca 12 subparcelas (22.223% de la parcela), con un índice de similitud de 0.68, este grupo está distribuido en los tres colores de suelo (rojo, café-rojizo y negro), el contenido de piedras alto, clase textural arcillo arenosa o arcillosa, el COT es mayor que en los dos anteriores grupos ($12.55\% \pm 4.37$) y menor densidad real $1.62 \text{ g cc}^{-1} \pm 0.37$ y densidad aparente $0.68 \text{ g cc}^{-1} \pm 0.08$. Es poco profundo y un alto valor de CC (Cuadro 7).

Cuadro 7. Estadística descriptiva de las propiedades en el grupo IV

Grupo IV Subparcela	Piedras (%)	Rocas (%)	COT (%)	DA (g cc^{-1})	DR (g cc^{-1})	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Prof. (cm)	CC (mL)
7	60	10	9.63	0.8	2.25	38	33	29	11	32.2
11	60	10	7.90	0.71	1.52	54	21	25	10.5	34.3
15	40	10	5.8	0.76	1.58	67	0	33	20.5	32.6
16	50	10	11.41	0.57	1.08	66	2	32	13.5	32.6
17	60	10	8.53	0.76	1.37	18	14	68	6.5	37
33	70	10	11.41	0.8	1.58	66	1	33	13.5	37.6
34	80	10	14.53	0.66	1.33	60	7	33	8.5	47.4
45	60	10	14.51	0.61	1.94	67	4	29	13	40.1
51	60	10	14.19	0.66	2.32	64	5	31	13.7	42.2
52	60	10	14.25	0.67	1.66	20	42	38	9.5	40.6
53	80	10	21.83	0.6	1.58	16	9	75	15.7	40.8
54	80	10	16.6	0.58	1.33	14	7	79	2.25	38.5
\bar{x}	63.33	10	12.55	0.68	1.62	45.83	12.08	42.08	11.52	37.99
S	12.30	0	4.37	0.08	0.37	22.79	13.35	19.63	4.66	4.59

El grupo V abarca nueve subparcelas (16.667 % de la superficie total de la parcela), con un índice de similitud de 0.70, este grupo presenta suelo de color café rojizo y negro, el contenido de piedras es alto (66.66 ± 10), la rocosidad es mayor en comparación a los anteriores grupos, la clase textural es franco arcillo arenosa, el contenido de COT se mantiene en $12.49\% \pm 2.95$ y existe una disminución de la densidad real $1.63 \text{ g cc}^{-1} \pm 0.39$ y la densidad aparente $0.64 \text{ g cc}^{-1} \pm 0.06$. Es un área menos profunda y con mayor CC (Cuadro 8).

Cuadro 8. Estadística descriptiva de las propiedades en el grupo V

Grupo V Subparcela	Piedras (%)	Rocas (%)	COT (%)	DA (g cc ⁻¹)	DR (g cc ⁻¹)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Prof. (cm)	CC (mL)
9	70	20	9.31	0.74	1.08	29	3	41	5.25	31.8
10	70	20	15.70	0.58	1.86	46	15	39	11	42.6
12	70	10	13.64	0.62	1.29	28	24	47	5.25	36.2
18	70	15	12.65	0.66	1.37	20	16	64	8.5	41.7
35	70	10	14.77	0.59	1.36	24	22	54	12	46.6
36	70	10	12.73	0.59	1.56	10	38	52	10.25	45
46	40	20	15.39	0.58	1.87	37	24	39	11.75	38.1
47	70	20	6.715	0.71	2.29	34	28	38	12.25	36.6
49	70	10	11.56	0.69	2.04	36	32	32	12.5	30.2
\bar{x}	66.66	15	12.49	0.64	1.63	29.33	22.44	45.11	9.86	38.75
S	10	5	2.95	0.06	0.39	10.57	10.27	10.00	2.88	5.66

El grupo VI está constituido por seis subparcelas (11.112% de la superficie total de la parcela), con un índice de similitud de 0.63, se encuentra constituidos por suelo de color café-rojizo y negro, existe una disminución en el contenido de piedras (21.67 ± 4.08) y un aumento en la rocosidad, clase textural franca, en esta área se encuentra el mayor contenido de COT ($13.39\% \pm 5.93$), el contenido de arcillas es el más bajo de toda la parcela, la densidad real tiene un valor de $1.84 \text{ g cc}^{-1} \pm 0.36$ y la densidad aparente $0.65 \text{ g cc}^{-1} \pm 0.05$. Es el área menos profunda y con mayor CC. Es un grupo con suelo de color oscuro, rocoso, somero, orgánico y con un bajo contenido de arcillas (Cuadro 9).

Cuadro 9. Estadística descriptiva de las propiedades en el grupo VI

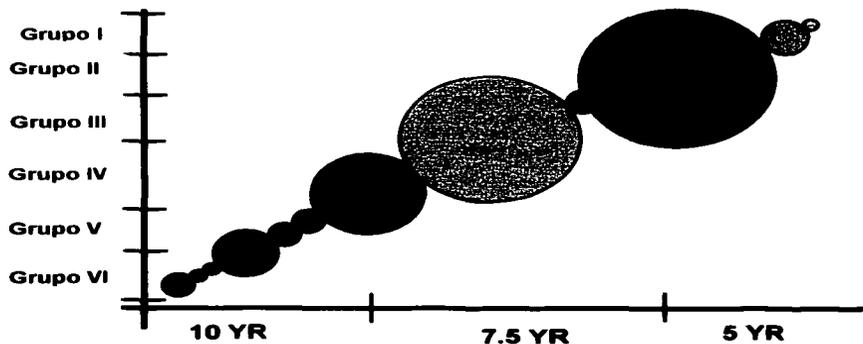
Grupo VI Subparcela	Piedras (%)	Rocas (%)	COT (%)	DA (g cc ⁻¹)	DR (g cc ⁻¹)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Prof. (cm)	CC (mL)
27	20	70	20.73	0.61	1.23	18	27	55	2.75	45.6
30	20	40	8.10	0.7	1.61	2	27	53	8.75	38.7
43	20	25	7.56	0.62	2.05	36	37	27	1.00	36.9
44	20	40	8.75	0.67	1.98	36	31	33	8.25	37.9
48	30	30	16.36	0.59	1.94	20	38	42	12.25	40.6
50	20	60	18.83	0.72	2.24	36	35	29	7.50	39.8
\bar{x}	21.67	44.17	13.39	0.65	1.84	24.67	32.50	39.83	6.75	39.92
S	4.08	17.44	5.93	0.05	0.36	13.89	4.89	12.14	4.15	3.08

El Cuadro 10 muestra el gradiente existente en cuanto a la formación de grupos, cada recuadro especifica el número de subparcelas por cada valor espectral. Así se observa que el grupo I solo contiene subparcelas de color rojo, al avanzar hacia un mayor grupo, disminuyen el número de subparcelas de color rojo y aumentan las subparcelas de color café-rojizo, hasta llegar al grupo VI ocupado por subparcelas de color café-rojizo y negro.

Cuadro 10. Datos generales por grupos.

		Grupo I	Grupo II	Grupo III	Grupo IV	Grupo V	Grupo VI	Grupo 0
Superficie (%)		18.518	11.112	14.814	22.223	16.667	11.112	5.556
Color	5 YR	10	3	2	2			1
	7.5 YR		3	6	9	5	3	1
	10 YR				1	4	3	1

La formación de los grupos corresponde al gradiente de color, es decir, cada grupo se encuentra asociado un parche de color de suelo, como se observa en la gráfica I, donde el tamaño de la esfera representa el número de subparcelas en cada intensidad y tono. La distribución es la siguiente: el grupo I se encuentra en la zona de valor espectral 5YR; el grupo II esta constituido una parte por subparcelas de color 5YR y otra mas de 7.5YR; el grupo III se encuentra en el parche 7.5YR; el grupo IV se ubica en el parche de color 7.5YR, el grupo V y VI tiene subparcelas de color 7.5YR y 10YR.



Gráfica I. Distribución de los grupos y valor espectral dominante.

En el Cuadro 11 se expresan las medias y desviaciones estándar de las características edáficas en función de cada uno de los grupos. Se observa las diferencias en cuanto a los valores de pedregosidad, rocosidad, profundidad y COT entre los grupos que se encuentran en el área de suelo de color rojo (grupo I) y el área de color negro (grupo VI), es decir, se establece un gradiente de los parámetros a través del color del suelo.

Cuadro 11. Estadística descriptiva por grupos

	Grupo I	Grupo II	Grupo III	Grupo IV	Grupo V	Grupo VI
Piedras (%)	16 ± 12	20 ± 5	40 ± 12	63 ± 12	66 ± 10	22 ± 4
Rocas (%)	9 ± 2	10 ± 0	14 ± 16	10 ± 0	15 ± 5	44 ± 17
COT (%)	5.69 ± 2.53	7.40 ± 3.70	9.21 ± 2.84	12.55 ± 4.37	12.49 ± 2.95	13.39 ± 5.93
DA (g cc ⁻¹)	0.87 ± 0.07	0.81 ± 0.07	0.83 ± 0.09	0.68 ± 0.08	0.64 ± 0.06	0.65 ± 0.05
DR (g cc ⁻¹)	2.17 ± 0.12	1.81 ± 0.46	2.17 ± 0.22	1.62 ± 0.37	1.63 ± 0.39	1.84 ± 0.36
Arcilla (%)	42 ± 7	51 ± 9	41 ± 4	46 ± 23	29 ± 10	25 ± 14
Limo (%)	34 ± 5	21 ± 9	34 ± 6	12 ± 13	22 ± 10	32 ± 5
Arena (%)	24 ± 5	28 ± 4	25 ± 5	42 ± 20	45 ± 10	40 ± 12
Prof. (cm)	23.85 ± 13.45	20.16 ± 7.06	9.46 ± 3.38	11.52 ± 4.66	9.86 ± 2.88	6.75 ± 4.15
CC (mL)	33.01 ± 4.01	34.91 ± 4.98	36.76 ± 4.20	37.99 ± 4.59	38.75 ± 5.66	39.92 ± 3.08

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



La foto superior izquierda muestra el parche de color rojo y valor espectral 5 YR; la foto superior derecha, corresponde al parche de color negro, con valor espectral 10 YR; finalmente, la foto de la izquierda muestra el parche de color café rojizo con valor espectral 7.5 YR, que se encuentran entre ambos tipos de suelo, indicando un carácter integrado.

La distribución de los diferentes tipos de suelos por color se muestra en la figura 6, en un mapa tipo raster donde se reconoce tres colores de suelos. El parche de color rojo y valor espectral 5 YR, se distribuye en su mayoría en la parte Norte de la parcela, dominan el suelo sin piedras, ni rocas y se encuentra en la zona más profundo de la parcela. El parche de color café rojizo con valor espectral 7.5 YR se distribuye en la parte sur de la parcela, existe manchones de este tipo de suelo que se encuentran entre los otros dos tipos de suelo (carácter integrado). El parche de color negro, con valor espectral 10 YR, se distribuye en la parte central de la parcela, se trata de un suelo delgado con numerosos afloramientos rocosos y cantidades considerables de piedras.

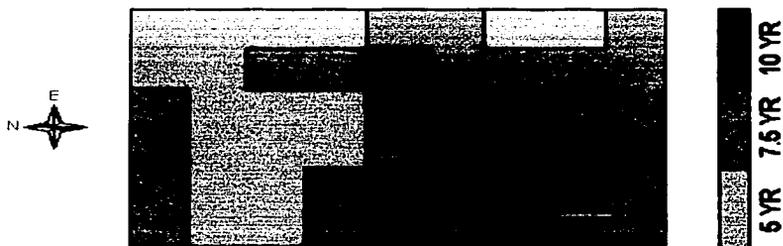


Figura 6. Mapa de distribución de colores, de acuerdo a su valor espectral.

Se realizaron mapas vectoriales con el programa SURFER de los nueve parámetros evaluados. A continuación se describen los cuatro parámetros seleccionados como propiedades distintivas (cantidad de limo, COT, densidad aparente y densidad real).

En los mapas vectoriales, la cantidad de limo presente en el suelo es una característica distintiva que explica el 76% de la variación total de los valores de la parcela. La distribución espacial del contenido de limo se observa en mayor cantidad hacia la parte norte de la parcela (en suelo de color rojo), principalmente

en la zona noroeste, al lado opuesto se observa el comportamiento inverso, es decir, en la parte sur disminuye las cantidades de limo (suelo café rojizo), mientras en el área Sureste se observa las menores cantidades de limo

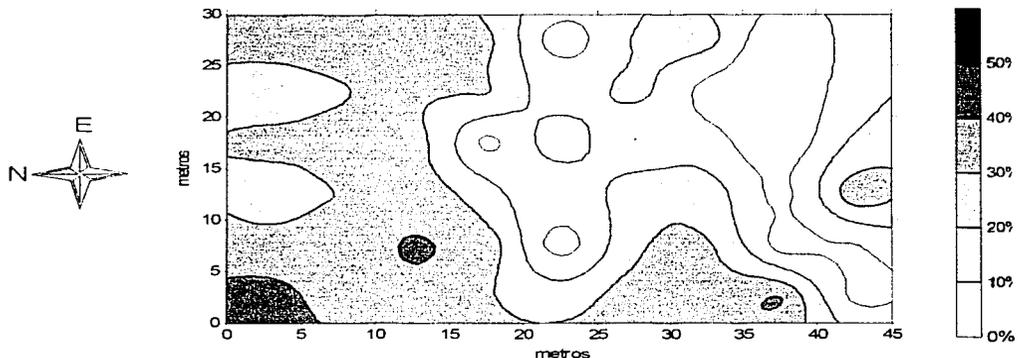


Figura 7. Mapa de porcentaje de limo

Con respecto a la distribución del contenido de limo y la formación de grupos, se observa que el grupo I corresponde a un contenido en promedio entre 30% y 45%, se encuentra bien definido en la zona norte (Figura 7). La distribución de este grupo corresponde a la zona del Leptosol réndzico (color rojo). El grupo II no se encuentra en un contenido de limo en particular, es decir, no existe una predominancia visible, tampoco se encuentra asociado a un color dado que esta en suelo rojo y en su mayor parte en café rojizo.

El grupo III se encuentra bien definido en la zona del alto porcentaje de limo (entre un 23 y 45%). El grupo IV se ubica en el suelo café rojizo, varía el contenido de limo, sin embargo, dentro de este grupo se encuentran las subparcelas con menor cantidad de limo. El grupo V se posiciona en su mayor parte en los intervalos de 23 a 38%, en suelo de color café rojizo y negro. El grupo VI corresponde a cantidades de limo de 30 a 45%, en suelo café rojizo y negro, este grupo se distribuye conforme a las isolíneas de alto contenido de limo. Los grupos 0 se localizan en una zona con bajo contenido de limo.

El contenido de carbón orgánico explica la variación entre subparcelas en un 69.62%, tiene un comportamiento inverso al del contenido de limo, es decir, en la zona norte de la parcela se encuentra una cantidad mínima de carbono orgánico (suelo rojo), hacia la parte sur se localizan los porcentajes mas altos de carbono orgánico (en suelos café rojizo y negro) (Figura 8). Se observa que el comportamiento del parche de color rojo sigue las isolíneas de menor concentración, en la parte sur existe un parche de suelo color rojo, mismo que corresponde con la isolínea de menor porcentaje de carbono orgánico.

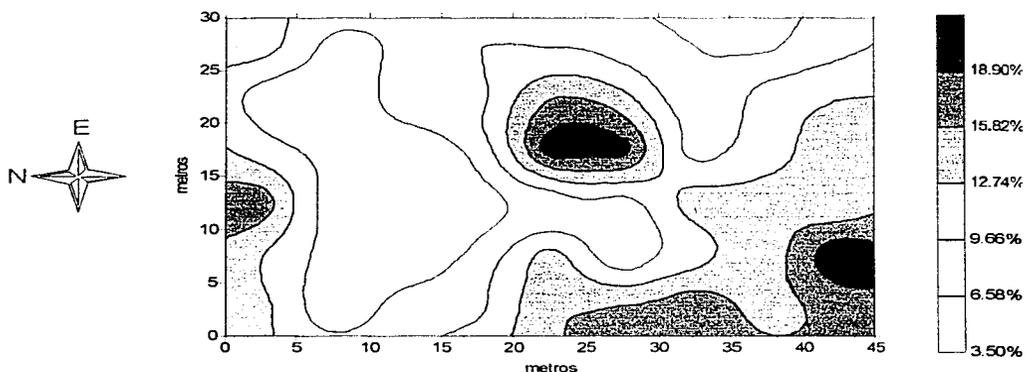


Figura 8. Mapa de porcentaje de carbono orgánico total (COT)

El grupo I se ubica en la zona de menor contenido de carbono orgánico (en promedio de 3.5%) aunque existe una subparcela que supera este valor. El grupo II no tiene una concentración característica, sin embargo, la mayor parte tiene un bajo contenido de carbono orgánico. El grupo III se encuentra asociado a la zona de bajo contenido de carbono orgánico, con un intervalo que abarca de 3.5 a 15.82% de carbono orgánico. El grupo IV tampoco tiene una concentración definida, pero su distribución corresponde al comportamiento de una isolínea (12.74%). El grupo V, se ubica en zonas de 6.58 a 18.90%, su distribución

corresponde al comportamiento del contenido de carbono orgánico. El grupo VI, no tiene una concentración definida.

El comportamiento de la densidad aparente explica en un 66.30% la variación de los valores en la parcela, en la parte norte se encuentran los valores altos de densidad aparente, mismos que corresponden al suelo de color rojo. En la parte central se localizan los valores de menor densidad y corresponden al parche de suelo de color negro. El parche de color café rojizo no está definido por una concentración, donde se presentan todos los valores.

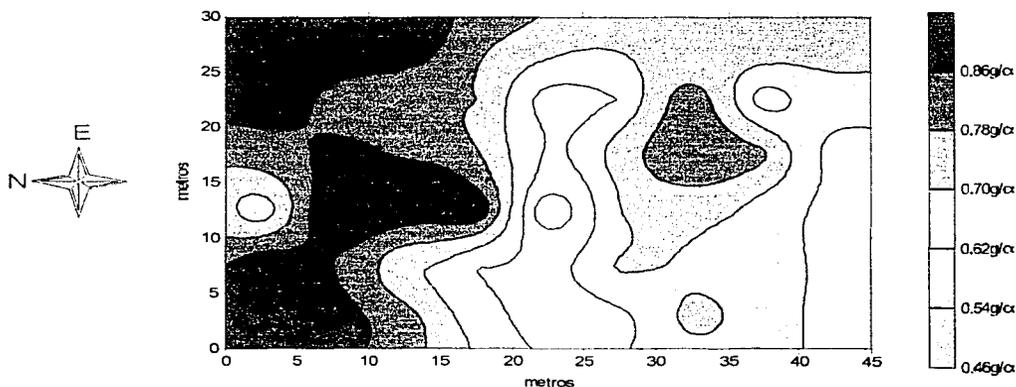


Figura 9. Mapa de densidad aparente

El grupo I se encuentra bien definido entre el 0.70 y el 0.94 g cc⁻¹ en suelo de color rojo. El grupo II se localiza en el parche de color café rojizo y concentraciones de 0.70 y 0.94 g cc⁻¹, manteniendo un patrón de distribución conforme a las isolíneas. El grupo III abarca el intervalo de 0.62 y 0.94 g cc⁻¹. El grupo IV abarca las subparcelas con valores entre 0.62 y 0.86 g cc⁻¹. El grupo V se distribuye en el área donde son menores los valores de densidad (0.54 g cc⁻¹), la presencia de este grupo puede asociarse a la distribución del grupo VI, donde los valores que comprenden este grupo son las sucesivas isolíneas (entre 0.62 y 0.78 g cc⁻¹).

Existe un único valor extremo en la parte central de la parcela de 0.46 g cc^{-1} , el cual no fue agrupado, en este mapa se observa como un valor anómalo (figura 9). El comportamiento de la densidad real en la parcela explica la variación en un 58.50%. Hacia la parte norte se localizan las subparcelas con mayor valor de densidad real (en suelo de color rojo), en la parte sur dominan las subparcelas con valores bajos de densidad real, principalmente en la zona de suelo café rojizo, en el parche negro se incluyen todas las clases.

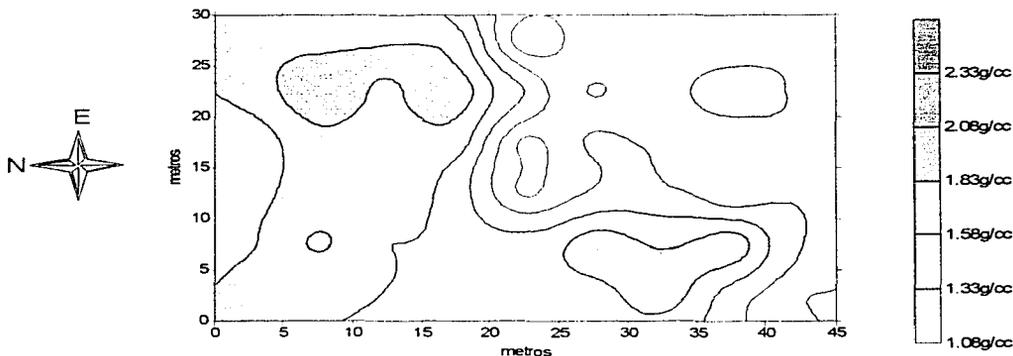


Figura 10. Mapa de densidad real.

El grupo I se ubica en la zona con altos valores de densidad real, al igual que el grupo III, entre 1.83 y 2.57 g cc^{-1} . El grupo II esta dividido en los extremos, contiene tanto zonas con densidad real de 2.20 g cc^{-1} y zonas con densidad real 1.3 g cc^{-1} . El grupo IV, V y VI no tienen un valor definido, ya que no siguen un patrón de distribución, dado que abarca todas las clases (Figura 10).

El resto de las variables (profundidad, pedregosidad, rocosidad, arena, arcilla, capacidad de campo) no contribuyeron a realizar la separación de los grupos, sin embargo, los mapas son presentados en la figura 11 a 16 del apéndice.

En el mapa de pedregosidad se observa que las zonas con bajo contenido de piedras coincide con el parche de suelo de color rojo, en este mapa se encuentran bien definido el grupo I, II y V. Las zonas más profundas de la parcela se

encuentran en el grupo I y II, sin embargo, no se observa claramente la formación de los grupos. Las zonas de menor rocosidad se encuentran en el grupo I y II, en este parámetro se puede observar que las 3 subparcelas que conforman el grupo 0 se encuentran en una zona de transición, lo que quiere decir que en un área de 5 X 5 cambia bruscamente el contenido de rocas montículos.

Existe mayor contenido de arena en los grupos I y II que corresponden al parche de suelo rojo, esto debido a su origen mineral. El mapa de contenido de arcilla muestra la homogeneidad del contenido de arcilla en la parcela, al igual que la capacidad de campo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO V. Discusión

Los resultados obtenidos a través del análisis de clasificación numérica de las subparcelas, permitió identificar las propiedades distintivas para la agrupación y elaboración de los mapas, con los cuales se pueda apreciar las limitantes químicas y físicas para el desarrollo de propuestas agrícolas. Las propiedades distintivas son: porcentaje de limo, contenido de carbono orgánico, densidad aparente y densidad real.

En la parcela se presentan tres colores de suelo, mismos que se relacionan con el microrelieve de la zona, en la parte baja se tienen suelo de color rojo con valor espectral 5YR asociado a una nula pedregosidad y rocosidad; la parcela tiene un suelo delgado (1 a 29 cm), esto concuerda con lo reportado por Bautista y colaboradores (1999).

El grupo I está caracterizado por un color rojo (Leptosol réndzico), de origen mineral y presentan las mayores densidades, esta conformado por 10 subparcelas (18.5%), sin piedras, ni rocas, es un grupo que se localiza en la zona más profunda y se distribuye homogéneamente en la parte oeste de la parcela.

El grupo II (Leptosol réndzico) de color café rojizos y rojos, de clase textural arcilloso, con baja pedregosidad y rocosidad, contiene un valor bajo de carbono orgánico y baja capacidad de campo.

El grupo III (Leptosol lítico) presenta colores café rojizos, rojos, con piedras, altos contenidos de carbono orgánico y son someros.

El grupo IV (Leptosol lítico/Leptosol esquelético) son suelos pedregosos arcillosos, ocupa la mayor extensión (22.22%), ubicado en la parte Este, predomina el color café-rojizo, sin embargo, se incluyen dos subparcelas de color rojo y una de color negro. En este grupo existe una alta variación en la textura y contenido de carbono orgánico.

El grupo V (Leptosol lítico esquelético) presenta un suelo de color café rojizos, negros, pedregosos y limosos.

El grupo VI (Leptosol lítico húmico) presenta un color negro, café rojizo, rocoso y tiene el valor más alto de carbono orgánico en toda la parcela y la más alta

capacidad de campo; se caracteriza por conservar un mayor tiempo su humedad, debido a que la pedregosidad y rocosidad reducen la evaporación.

Existe mayor heterogeneidad espacial en los suelos de color café-rojizo, por presentar un mayor número de grupos.

El análisis del color, textura, materia orgánica y densidad real es rápido y económico, por lo tanto permite elaborar mapas parcelarios con las mismas ventajas. Estos parámetros que son rápidos y económicos de calcular, permiten realizar estimaciones burdas de otras características edáficas más costosas y que requieren más tiempo. Por ejemplo, de la textura se puede inferir la capacidad de intercambio catiónico, estimar el drenaje interno, reservas minerales y riesgos de erosión. Los datos de carbono orgánico evalúan el contenido de materia orgánica, fertilidad y capacidad de soporte de vegetación. El color del suelo, como propiedad clave para la elaboración de grupos, es de suma importancia dado que permite estimar el contenido de materia orgánica y óxidos de hierro y manganeso, así como propiedades mineralógicas.

La parcela cuenta con tres suelos de diferentes colores, el carbono orgánico y la capacidad de campo se comportan en forma de gradientes siguiendo un patrón en función del microrelieve. Sin embargo, se deben tomar en cuenta la pedregosidad y rocosidad dado que es un factor limitante, que restringe la producción de ciertos tipos de cultivo y el uso de ciertas tecnologías agrícolas.

El color del suelo es una propiedad distintiva de zonas de alta heterogeneidad cársticas, y tiene una gran correspondencia con sus propiedades físicas y químicas, es decir, el color del suelo permite inferir sus propiedades edáficas.

El color del suelo refleja propiedades de relación suelo-planta, se encuentra asociado a propiedades como el contenido materia orgánica; también sirve para conocer las proporciones y tipos de minerales, condiciones de drenaje, aireación y porosidad.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO VI. Conclusiones

1. El método de levantamiento de suelos a nivel parcela en zonas cársticas, pueden realizarse utilizando cuadrantes de 25 m².
2. Los mapas parcelarios se pueden elaborar a partir de los datos de color, textura, contenido de carbono orgánico, densidad real y densidad aparente, las cuales son propiedades de bajo costo.
3. Los mapas de suelo tipo raster pueden realizarse de manera sencilla con una hoja de papel cuadrícula o con mayor detalle y sofisticación, tipo vectorial, con el programa *Surfer*.
4. La coloración del suelo depende principalmente, de la presencia de coloides orgánicos e inorgánicos y condiciones de drenaje, se trata de una propiedad distintiva en zonas de alta heterogeneidad cársticas.
5. La pedregosidad y rocosidad favorecen un incremento del carbono orgánico y la capacidad de campo, como consecuencia de la estabilización del humus por el calcio derivado del material geológico.
6. Se deben tomar en cuenta la pedregosidad y rocosidad como factores limitantes en la producción de los cultivos y el empleo de ciertas tecnologías agrícolas.
7. La parcela cuenta con tres suelos de diferentes colores, uno de color rojo de origen mineral, profundo, localizado en la parte baja, es poco rocoso y sin piedras. Otro situado al pie del monte, es de color café rojizo resultado de la mezcla del suelo rojo y el negro, en éste la cantidad de piedras aumenta a medida que se intensifica el color negro. Finalmente, el suelo de color negro es más fértil, menos profundo y se encuentra prácticamente sobre la coraza calcárea.
8. Las propiedades como profundidad, densidad real, densidad aparente y carbono orgánico son indicadoras de la calidad del suelo y permiten conocer el estado de conservación de este recurso natural e inferir el carácter benéfico o perjudicial de la relación producción ambiente.

-
9. El color del suelo puede ser utilizado con éxito en la elaboración de mapas parcelarios en la zona cárstica de calizas.
 10. El grupo I y II están definidos por una baja pedregosidad, bajos contenidos de materia orgánica y valores mayores de densidad real, propiedades estrechamente relacionadas entre sí.
 11. Los grupos IV y V se caracterizan por ser pedregosos y de color café rojizo.
 12. El grupo VI es el más somero, rocoso, rico en materia orgánica y carente de pedregosidad.
 13. Finalmente, el color del suelo en el área de estudio, indica el dominio del proceso genético de rubefacción en los grupos I y II, mientras que en el resto de los grupos domina la melanización.

CAPÍTULO VII. Bibliografía

1. Afifi, A. A. y V. Clark. 1988. Computer-aided multivariate analysis. Segunda Edición. Chapman and Hall. Nueva York.
2. Arkley R. J. 1991. Statistical methods in soil classification research. Department of Soil and Plant Nutrition, University of California, California.
3. Aguilera H. N. 1989. Tratado de edafología de México. Tomo I. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
4. Anderson J.M., Ingram J. S. I. 1993. Tropical soil biology and fertility. A handbook of methods, 2da. Edition, United Kingdom.
5. Arnold, W., Scaboles I., Targulian V. O. 1990. Global Soil Change. International Report of an IIASA-ISSS-UNEP. Task Force Institute for Applied Systems Analysis. Luxembourg. Austria
6. Bautista-Zuñiga F., Estrada-Medina H., Delgado-Carranza C. y Sosa-Padilla M. 1999. Propuesta metodológica para el levantamiento de terrenos en zonas cársticas de la Península de Yucatán. FMVZ-UADY.
7. Bautista-Zuñiga F, G. Palacio-Aponte y M. Castillo-González. 2002a. Bases de datos de suelos de la península de Yucatán incluyendo la nomenclatura Maya y FAO. Departamento de manejo y conservación de recursos naturales tropicales. FMVZ, UADY.
8. Bautista-Zuñiga F; J. Jiménez-Osornio; J. Navarro-Alberto; A. Manu; R. Lozano. 2002b. Microrelieve y color del suelo como propiedades de diagnóstico en Leptosoles cársticos. *Terra*. En Prensa.
9. Bautista-Zuñiga F., Rivas-Solórzano H., Durán de Bazúa C y G. Palacio. 1998. Caracterización y clasificación de suelos con fines productivos en Córdoba, Veracruz, México. *Investigaciones Geográficas*, 36: 21-33.
10. Cordova O. J. 2001. Geografía y Cartografía: reflexiones sobre el status científico de una simbiosis necesaria. Geografía para el tercer milenio. Instituto de Geografía. UNAM. México.
11. Cuadernos Estadísticos Ambientales de SEMARNAP. 1998. Informe de suelos, 1998.

-
12. Dijkerman J. C. 1981. Field description, morphology and sampling of soils. Wageningen Agricultural University. Wageningen, The Netherlands.
 13. Duch G. J. 1988. La conformación territorial del Estado de Yucatán. Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México.
 14. Dutilleul P. 1993. Spatial heterogeneity and design of ecological experiments. *Ecology*, 74(6): 1646-1658.
 15. Espadas M. C. 2002. Introducción a los sistemas de información geográfica. Centro de Investigación Científica de Yucatán.
 16. FAO/UNESCO. 1999. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. FAO-SICS-ISRIC, Roma, Italia.
 17. Fernández A. L., Rodríguez G. J. 1994. Estudio comparativo cartográfico-estadístico de algunas características físicas y químicas de suelos tropicales de montaña. Memorias del Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo, Montpellier, Francia.
 18. Flamand, C. 1995. Introducción a la edafología. Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México.
 19. Flores S. J., Espejel C. I. 1994. Tipos de vegetación de la península de Yucatán. Serie Etnoflora Yucatanense, Fascículo 3, Universidad Autónoma de Yucatán.
 20. Foth H. D., Turk L. M. 1980. Fundamentos de la ciencia del suelo. Continental, México.
 21. Gandoy B. W. 1991. Manual de laboratorio para el manejo físico de suelos. Universidad Autónoma de Chapingo, Colección de Cuadernos Universitarios. México.
 22. García E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Apuntes de climatología. Talleres Larios. México.
 23. Herrera S. J. 1994. Spatial Heterogeneity and Seasonal Patterns in a Tropical Coastal Lagoon. *Journal of Coastal Research*, 10(3), 738-746.
 24. Jackson, D.A. 1993. Stopping rules in principal component analysis: a comparison of heuristical and statistical approaches. *Ecology* 74(8): 2204-2214.

-
24. Journel A. G., Rossi R. E. 1992. Geostatistical tools modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecological Monographs* 62(2) 277-314.
 25. Kovach, W. L. 1995. MVSP- A multivariate Statistical Package for IBM-PC's ver 2.2. Kovach Computing Services. Gales, Reino Unido.
 26. Legendre, L y P. Legendre. 1983. Numerical ecology. *Elsevier scientific Publishing Co. New York.* 419-429.
 27. Munsell Soil colors chaarts. 1990. Munsell color Macbeth division of foll-morgen instrument corporation. Baltimore. Maryland.
 28. Myers D. E. 1991. Interpolation and estimation with spatially located data. *Elsevier scientific Publishing Co. New York* 209-228.
 29. Navarro A. 1998, Cuadernos de estadística. Academia de ecología. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Yucatán, México.
 30. Okalebo J. R., Gathua K. W., Woomen P. L. 1993. Laboratory methods of soil and plant analysis: A working manual. Tropical Soil biology and fertility program (TSBF), Kenya.
 31. Ortiz V. B., Ortiz S. C. 1990. Edafología, Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de suelos, Séptima edición.
 32. Ovalles V. F. 1998. Herramientas para la evaluación de tierras en zonas Tropicales: Uso de la Geoestadística. Universidad de Lleida, España.
 33. Pla, I. 1986. Análisis multivariado: método de componentes principales. Monografía No. 27. Organización de Estados Americanos. Washington.
 34. Porta, J. López Acevedo, M, Roquero, L. 1999. Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente. Ediciones Multi-Prensa, 2ª impresión, Barcelona, España.
 35. Rangel L. L., Henríquez R. M. 1997. Delimitación de unidades cartográficas de suelos mediante análisis por componentes principales, geoestadística y conjuntos borrosos. Memorias del Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo, Montpellier, Francia.
 36. Regulo L. A. 1984. Nueva edafología. Grupo editorial Gaceta, Texcoco, México.

-
37. Sandoval L. J., Martínez R. L. 1995. Clasificación de tierras para el manejo del suelo y agua en la subcuenca de Cuзалapa, Sierra del Manantlan, Jalisco. *Terra* 13(3) 216-230.
 38. Siebe C., Jahn R., Stahr K. 1996. Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C. México.
 39. Sommer C. I., Fernández L. P., Rivas S. H., Gutiérrez R. M. 2000. La geoestadística como herramienta en estudios de contaminación de suelos, análisis de caso: afectación por Arsénico, Plomo y Cadmio contenido en jales mineros. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 16 (4), 205-214.
 40. Spavorek G., Camargo O. A. 1990. Muestreo en floresta. IX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, La Habana, Cuba.
 41. Tapia L. M., Ruiz A. C., Tiscarreño V. M- Venegas G. E, Sánchez C. B., Molina R., Chávez X. C. 1995. Áreas potenciales para el cultivo de cucurbitáceas en el proyecto de riego Chilatan de Tepalcatepec, Michoacán. *Terra*. 13(3) 231-243.
 42. Teuscher H., Adler R., Seaton J. P. 1985. El suelo y su fertilidad. Ed. Continental, México.
 43. Webster R., Oliver M. A. 1990. Statistical methods in soil and land resource survey. Oxford University Press, New York.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Apéndice

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Cuadro 12. Tabla de resultados

Parcela	Grupo	Ubicación	Color	Pedregosidad (%)	Rocosisidad (%)	Carbono orgánico total (%)	Densidad aparente (g cc ⁻¹)	Densidad real (g cc ⁻¹)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Profundidad (cm)	Capacidad de campo (mL)
1	1	46	5YR4/4	40	10	11.82	0.94	2.22	52	33	15	33	26.5
2	2	37	5YR4/4	20	10	4.98	0.9	2.2	45	26	29	29.25	37.1
3	3	47	5YR4/4	25	15	5.77	0.9	2.25	46	34	20	12.5	37.5
4	2	38	5YR4/4	15	10	3.88	0.84	2.57	50	29	21	21.75	29.1
5	3	48	5YR4/4	30	20	7.11	0.93	2.32	45	37	18	7.75	30.1
6	3	39	7.5YR3/4	30	5	8.72	0.78	2.26	44	31	25	15.5	32.2
7	4	49	5YR4/4	60	10	9.63	0.8	2.25	38	33	29	11	32.2
8	3	40	7.5YR2.5/3	35	50	8.45	0.78	2.56	44	31	25	10.5	39.6
9	5	50	7.5YR3/3	70	20	9.31	0.74	1.08	29	3	41	5.25	31.8
10	5	41	10YR2/1	70	20	15.70	0.58	1.86	46	15	39	11	42.6
11	4	51	7.5YR3/4	60	10	7.90	0.71	1.52	54	21	25	10.5	34.3
12	5	42	7.5YR3/3	70	10	13.64	0.62	1.29	28	24	47	5.25	36.2
13	2	52	5YR4/4	30	10	6.57	0.74	1.54	43	25	32	21	29.4
14	2	43	7.5YR4/4	20	10	6.61	0.83	1.41	67	6	27	25.25	41.7
15	4	53	5YR4/4	40	10	5.80	0.76	1.58	67	0	33	20.5	32.6
16	4	44	7.5YR4/4	50	10	11.41	0.57	1.08	66	2	32	13.5	32.6
17	4	54	7.5YR3/4	60	10	8.53	0.76	1.37	18	14	68	6.5	37
18	5	45	7.5YR3/4	70	15	12.65	0.66	1.37	20	16	64	8.5	41.7
19	3	28	7.5YR3/4	40	5	7.94	0.82	1.84	41	32	27	4.75	35.5
20	3	19	7.5YR3/4	50	5	15.11	0.64	1.95	41	26	33	6.75	42.9
21	1	29	5YR4/6	10	10	5.47	0.88	2.28	39	33	28	22	33.8
22	1	20	5YR4/4	10	5	4.49	0.94	2.27	41	30	29	18	33
23	1	30	5YR4/6	10	10	4.89	0.85	2.11	48	35	17	32	31.5
24	1	21	5YR4/4	10	10	3.93	0.9	2.24	41	38	21	54.75	31.5
25	0	31	5YR3/4	10	30	7.44	0.79	2.26	43	6	51	7	32
26	1	22	5YR3/4	10	10	4.26	0.94	1.97	51	24	25	25.25	38.4
27	6	32	10YR2/2	20	70	20.72	0.61	1.23	18	27	55	2.75	45.6
28	0	23	7.5YR2.5/2	10	50	6.98	0.46	1.25	54	12	34	4.75	33.2
29	0	33	10YR2/2	55	35	20.27	0.75	1.67	50	9	41	11.25	65.11
30	6	24	10YR3/2	20	40	8.09	0.7	1.61	2	27	53	8.75	38.7

TESIS N° 1
 FALTA DE CUBIERTA

Cuadro 12. Tabla de resultados (continuación)

Parcela	Grupo	Ubicación	Color	Pedregosidad (%)	Rocosidad (%)	Carbono orgánico total (%)	Densidad aparente (g cc ⁻¹)	Densidad real (g cc ⁻¹)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Profundidad (cm)	Capacidad de campo (mL)
31	2	34	7.5YR3/4	20	10	7.98	0.86	1.56	52	16	32	11.5	34.3
32	2	25	7.5YR3/3	15	10	14.39	0.72	1.61	47	27	29	12.25	37.9
33	4	35	7.5YR3/4	70	10	11.41	0.8	1.58	66	1	33	13.5	37.6
34	4	26	7.5YR3/3	80	10	14.53	0.66	1.33	60	7	33	8.5	47.4
35	5	36	7.5YR2.5/3	70	10	14.77	0.59	1.36	24	22	54	12	46.6
36	5	27	7.5YR3/3	70	10	12.73	0.59	1.56	10	38	52	10.25	45
37	3	10	7.5YR3/3	60	5	9.74	0.92	2.05	35	33	32	8.5	40
38	3	1	7.5YR3/4	50	5	10.87	0.89	2.15	35	45	21	9.5	36.3
39	1	11	5YR4/6	40	10	5.06	0.86	2.38	40	35	25	13	30.4
40	1	2	5YR4/4	10	5	4.08	0.9	2.13	38	36	26	18	39.6
41	1	12	5YR4/4	10	10	4.36	0.7	2.08	30	41	29	14	29.7
42	1	3	5YR4/3	10	10	8.56	0.83	2.07	40	39	21	8.5	35.7
43	6	13	7.5YR3/4	20	25	7.56	0.62	2.05	36	37	27	1	36.9
44	6	4	7.5YR3/2	20	40	8.75	0.67	1.98	36	31	33	8.25	37.9
45	4	14	10YR3/3	60	10	14.51	0.61	1.94	67	4	29	13	40.1
46	5	5	10YR2/2	40	20	15.39	0.58	1.87	37	24	39	11.75	38.1
47	5	15	10YR3/3	70	20	6.71	0.71	2.29	34	28	38	12.25	36.6
48	6	6	7.5YR	30	30	16.35	0.59	1.94	20	38	42	12.25	40.6
49	5	16	10YR2/2	70	10	11.56	0.69	2.4	36	32	32	12.50	30.2
50	6	7	10YR2/2	20	60	18.82	0.72	2.24	36	35	29	7.5	39.8
51	4	17	7.5YR3/2	60	10	14.19	0.66	2.32	64	5	31	13.75	42.2
52	4	8	7.5YR3/3	60	10	14.25	0.67	1.66	20	42	38	9.5	40.6
53	4	18	7.5YR3/2	80	10	21.83	0.6	1.58	16	9	75	15.75	40.8
54	4	9	7.5YR3/2	80	10	16.60	0.58	1.33	14	7	79	2.25	38.5

TESIS CON
 FALTA DE CUBRIR

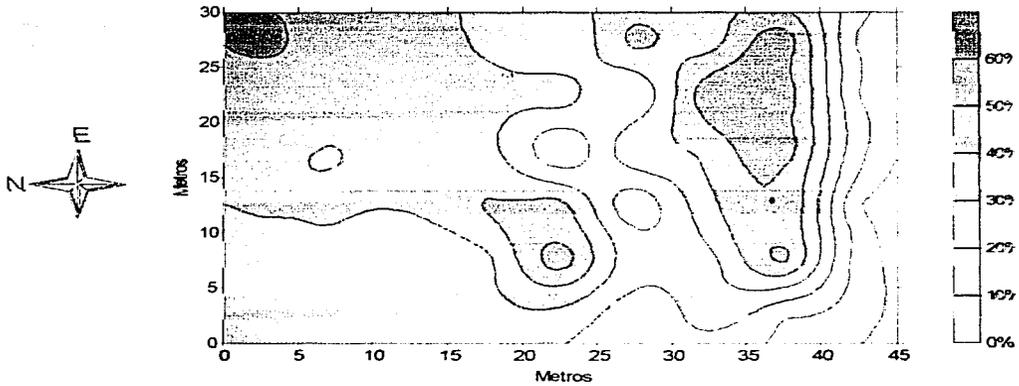


Figura 11. Mapa de porcentaje de arcilla

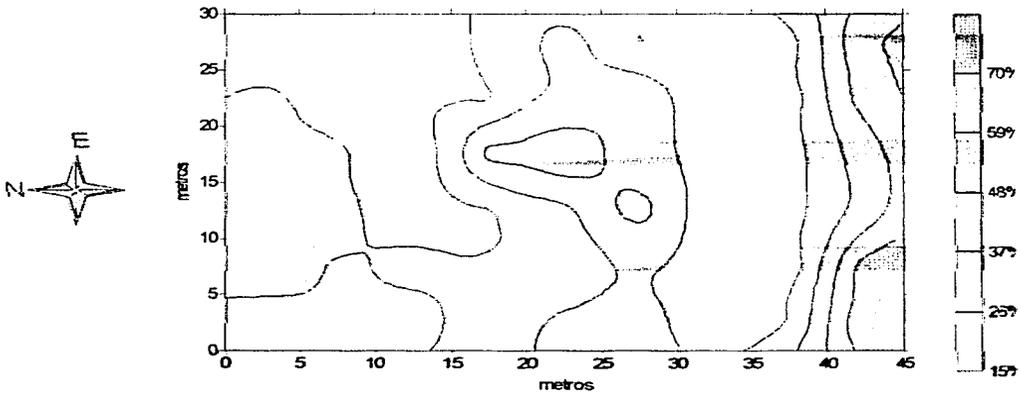


Figura 12. Mapa de porcentaje de arena

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

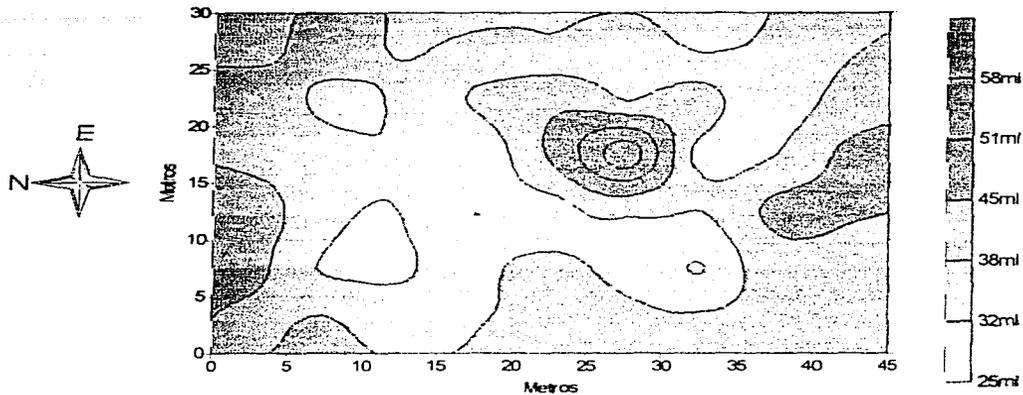


Figura 13. Mapa de capacidad de campo

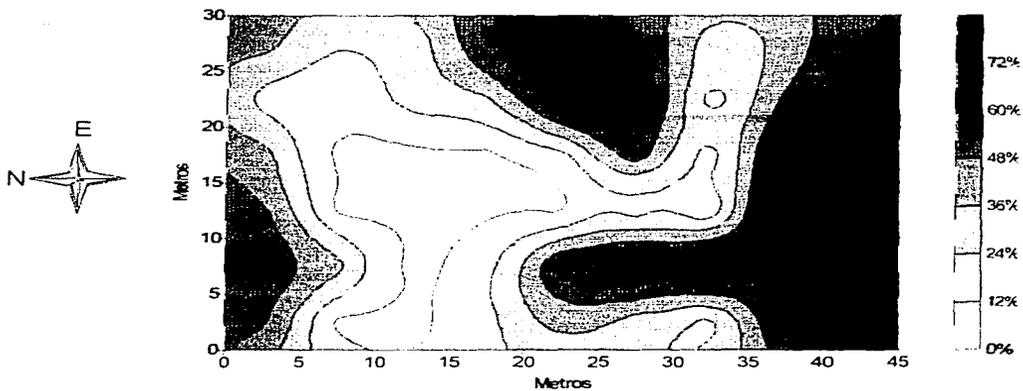


Figura 14. Mapa de porcentaje de piedras

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

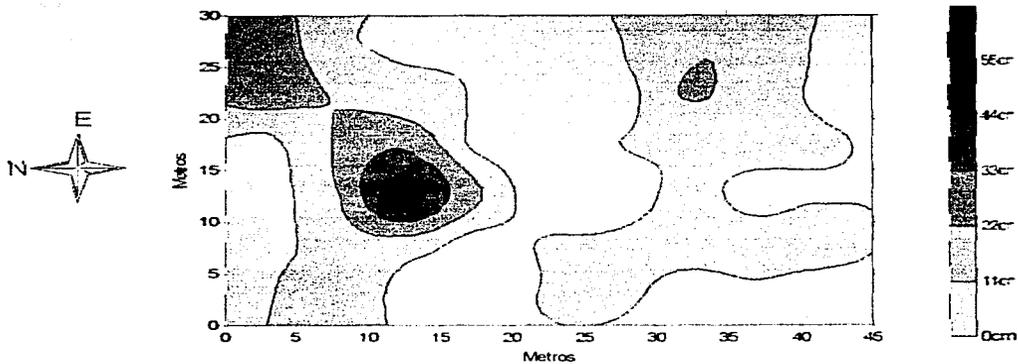


Figura 15. Mapa de profundidad

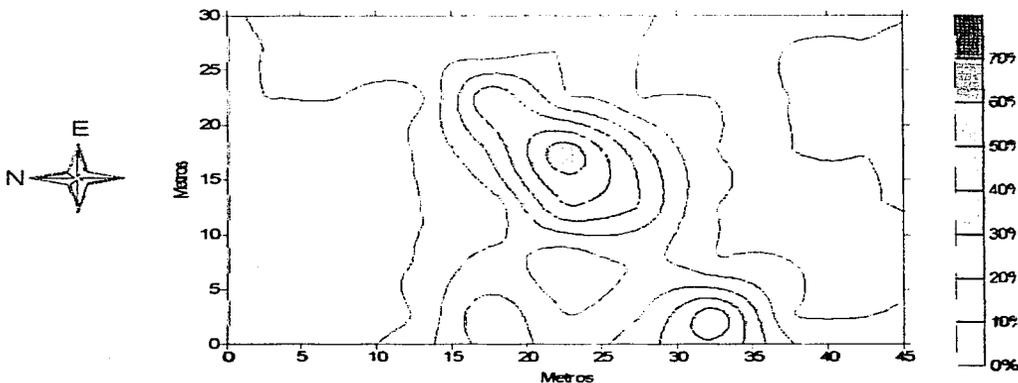
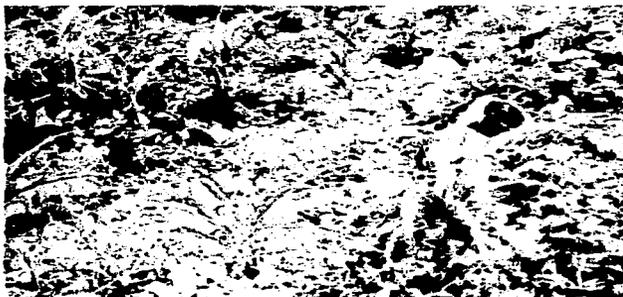


Figura 16. Mapa de porcentaje de rocosidad

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Foto que muestra el aspecto general de la parcela, de relieve de plano a ligeramente ondulado y con límites entre las subparcelas.



La parcela muestra diferentes grados de pedregosidad, distribuida de manera heterogénea.



La rocosidad corresponde a diversos afloramientos de la coraza calcárea, lo cual resulta una fuerte limitante a las actividades agrícolas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN