

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

Facultad de Filosofía y Letras

División de Estudios de Posgrado

**ECOLOGÍA DEL PAISAJE COSTERO EN LAGUNA DE TÉRMINOS, CAMPECHE.  
DIAGNÓSTICO AMBIENTAL PARA EL MANEJO**

**T E S I S** QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

**DOCTOR EN GEOGRAFÍA**

**P R E S E N T A :**

*Álvaro Gerardo Palacio Aponte*

**Director de Tesis:**

**Dr. Mario Arturo Ortiz Pérez**

**MÉXICO, D.F., 2006**



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.

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer principalmente a mi querido maestro y asesor Dr. Mario Arturo Ortiz, su orientación, apoyo y ejemplo. Un hombre sabio y sencillo que me ha honrado con su invaluable amistad.

Agradezco infinitamente el apoyo moral y académico de la Dra. Isabel Ramírez, la valiosísima amiga y profesional que me ayudo a darle estructura final a la tesis.

A los miembros del sínodo Dr. José Ramón Hernández, Dr. Arturo García, Dr. Lorenzo Vázquez, Dra. Silke Cram y Dra. Laura Elena Maderey, por contribuir, sin duda alguna, a mejorar sustancialmente de forma y fondo, el primer documento de tesis.

A mis amigos y hermanos de toda la vida Alejandro D´Luna, Jesús Fuentes y Delia Guerrero por estar siempre presentes apoyando en momentos importantes durante el desarrollo y la conclusión de la tesis.

***A LAS MUJERES QUE LE DAN SENTIDO A MI VIDA, LATIDOS A MI CORAZÓN Y LUZ A MIS OJOS.  
PARA LILY MI ESPOSA, EL AMOR DE MI VIDA, MI COMPAÑERA Y AMIGA, Y  
PARA MI HIJA, MI ETERNA BEBITA JULIETA, EL AMOR MÁS PURO QUE DIOS ME HA ENVIADO,  
UNA HERMOSA FLOR NACIENTE QUE NO SE MARCHITARÁ NUNCA,  
LA SUSTANCIA Y FUNDAMENTO DE MI ALMA Y  
LA RAZÓN DE MI SER Y EXISTIR.***

***A MI MADRE (†) SIEMPRE VIVA EN MI MENTE Y MI CORAZÓN***

## CONTENIDO

<b>ÍNDICE DE CUADROS.....</b>	<b>5</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>6</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>8</b>
<i>La zona costera y la ciencia del paisaje</i>	10
<i>Ecología del paisaje y diagnóstico ambiental</i>	12
<b><u>CAPÍTULO I</u>.....</b>	<b>13</b>
<b>I.- ECOLOGÍA DEL PAISAJE COSTERO. CONCEPCIÓN TEÓRICA .....</b>	<b>13</b>
<b>I.1.- Concepción paisajística de la zona costera. ....</b>	<b>15</b>
I.1.1.- Emplazamiento de los elementos y estructura del paisaje costero.	16
I.1.2.- Funcionamiento.	21
I.1.3.- Evolución natural e inducida.	25
<b>I.2.- Índice de conectividad costera. ....</b>	<b>27</b>
<b><u>CAPÍTULO II</u>.....</b>	<b>31</b>
<b>II.- DELIMITACIÓN DE LAS UNIDADES DEL PAISAJE COSTERO.....</b>	<b>31</b>
<b>II.1.- Metodología. ....</b>	<b>31</b>
II.1.1.- Modelo conceptual.	33
II.1.2.- Reglas de decisión e integración.	36
II.1.2.1.-Interfase continental.	38
a) Fase preliminar.	38
▪ Delimitación preliminar de las unidades de la interfase continental.	38
▪ Ajuste digital de las fronteras mediante un ACP (Análisis de Componentes Principales).	39
▪ Identificación de la predisposición del relieve a la movilidad superficial del agua.	41
b) Fase de campo.	42
c) Fase final.	46
II.1.2.2.- Interfase marina.	47
a) Fase preliminar.	47
b) Fase de campo.	49
c) Fase final.	50
▪ Determinación de la relevancia de los elementos del paisaje en la conformación de unidades en la interfase marina.	50
▪ Análisis de conglomerados y su relación con las variables físico-químicas y su significado espacial.	51
▪ Modelaje para la creación de superficies continuas a través variables puntuales.	52
▪ Detección de turbidez como indicador físico discreto de las fronteras en la interfase marina.	54
<b>II.2.- Estructura espacial y tipología de unidades del paisaje en Laguna de Términos, Campeche. ....</b>	<b>56</b>
a).-Interfase marina.	58
b).-Interfase continental.	62
<b>II.3.- Índice de conectividad costera en Laguna de Términos, Campeche. ....</b>	<b>69</b>

<b><u>CAPÍTULO III</u></b> .....	<b>73</b>
<b>III.- GEOINDICADORES DE CAMBIOS EN EL PAISAJE COSTERO Y DIAGNÓSTICO AMBIENTAL</b> .....	<b>73</b>
<b>III.1.- Concepto y tipificación.</b>	<b>73</b>
<b>III.2.- Geoindicadores para el diagnóstico ambiental en ambientes costeros.</b>	<b>76</b>
III.2.1.-ÍNDICE DE MODIFICACIÓN DE LA CUBIERTA VEGETAL.	77
III.2.1.1.- Conceptualización y criterios de evaluación.	77
III.2.1.2.-Materiales y métodos.	82
III.2.1.3.- Resultados.	85
III.2.1.3.1.- Índice de modificación de la cubierta vegetal.	89
III.2.2.-DETECCIÓN DE CAMBIOS EN LA MORFOLOGÍA LITORAL.	93
III.2.2.1. – Materiales y métodos.	94
III.2.2.2.- Resultados.	95
III.2.3.- SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO ANTE LA OCURRENCIA DE HURACANES.	100
III.2.3.1.- Materiales y métodos.	101
III.2.3.1.1.- Modelo conceptual y análisis de variables de susceptibilidad.	105
▪ Fijación biogénica.	107
▪ Movilidad del sustrato.	111
▪ Predisposición dinámica de las geoformas costeras.	113
▪ Evidencias sedimentarias y morfológicas del oleaje de tormenta.	115
▪ Ubicación relativa de la amenaza en el perfil transversal de afectación y su relación con los procesos físicos.	118
▪ Régimen intermareal.	119
▪ Fenomenología.	120
▪ Ponderación multicriterio de variables de susceptibilidad y modelado cartográfico en un SIG.	120
III.2.3.2.-Resultados.	123
<b>CONCLUSIONES GENERALES</b> .....	<b>125</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>129</b>

## Índice de cuadros

Cuadro 1.- Principales características de los ecotonos en el paisaje costero .....	18
Cuadro 2.- Relaciones de conectividad entre unidades contiguas del paisaje costero. ....	29
Cuadro 3.- Descripción general y umbrales de medición de las variables de conectividad en el paisaje costero. ....	30
Cuadro 4.- Matriz de covarianza Tasseld cap.....	40
Cuadro 5.- Análisis de componentes principales de las variables físico-químicas del agua en la Laguna de Términos, Camp. ....	51
Cuadro 6.- Tipologías jerárquicas del paisaje. ....	57
Cuadro 7.- Tipología del paisaje costero en la Laguna de Términos, Camp.....	59
Cuadro 8.- Geoindicadores aplicados en el área de estudio.....	76
Cuadro 9.- Componentes de la perturbación desde la visión paisajística. ....	79
Cuadro 10.- Caracterización paisajística de los grados de modificación.....	82
Cuadro 11.- Clave de cambios en la cubierta vegetal para tipificar los grados de modificación. ....	83
Cuadro 12.- Modificaciones al paisaje en la Laguna de Términos, Camp., entre 1974 y 2001 identificadas ..... mediante técnicas de detección de cambios con imágenes Landsat.....	86
Cuadro 13.- Información tabular de fragmentación del paisaje entre la fecha más antigua disponible (1974) y la más reciente (2001), para la Laguna de Términos, Camp.....	90
Cuadro 14.- Índice de modificación por unidades del paisaje y período histórico en la Laguna de Términos. Camp.....	92
Cuadro 15.- Relaciones de color asociadas a la pérdida o ganancia de tierras litorales en un compuesto de falso color infrarrojo multifecha .....	94
Cuadro 17.- Cambios geomorfológicos identificados en el compuesto de falso color infrarrojo..... multitemporal (1970-1980-1990) en la Laguna de Términos, Camp. ....	95
Cuadro 18.- Pérdida y/o ganancia de tierras costeras en Laguna de Términos, Camp.....	97
Cuadro 19. – Nombre y año de los huracanes que han afectado la Península de Yucatán. ....	104
Cuadro 20.- Atributos de resiliencia de las especies de manglar ante los efectos destructivos de los huracanes. ....	110
Cuadro 21.- Relación de características granulométricas entre terrígenos y biogénicos.....	111
Cuadro 22.-Clasificación de la predisposición dinámica de las geoformas ante la ocurrencia de huracanes. ....	113
Cuadro 23.-Clasificación de las geoformas como indicadores de susceptibilidad ante la ocurrencia de huracanes. ....	117
Cuadro 24.- Variables ponderadas para evaluar la susceptibilidad del terreno ante la ocurrencia de huracanes. ....	122

## Índice de figuras

Figura 1.- Ubicación del área de estudio en el Estado de Campeche.....	10
Figura 2.- Estructura y funcionamiento del paisaje costero. ....	16
Figura 3.- Arreglo espacial de las unidades del paisaje costero.....	19
Figura 4.- Representación teórica de relaciones corológicas de conectividad en dos tipos de zona costera.....	24
A.- Planicie fluvio-palustre extendida y, B.-Acantilados costeros.....	24
Figura 5.- Etapas de la metodología para la delimitación de unidades del paisaje costero.....	32
Figura 6.- Modelo conceptual de la interfase continental del paisaje costero.....	35
Figura 7.- Modelo conceptual de la interfase marina del paisaje costero.....	36
Figura 8.- Delimitación preliminar de las unidades del paisaje costero en la interfase continental de la.....	39
Laguna de Términos, Camp. ....	39
Figura 9.- Compuesto de falso color Tasseld cap en la Laguna de Términos, Camp.....	40
Figura 10.- Modelo topográfico del terreno en la Laguna de Términos, Camp., señalando el.....	41
área de influencia máxima de marea sobre terrenos terrestres continentales .....	41
Figura 11.- Rutas de los recorridos de campo en la Laguna de Términos, Camp.....	43
Figura 12.- Vegetación mesofítica representativa de planicies palustres emergentes en la Laguna de Términos, Camp. ....	43
Figura 13.- Mangle rojo ( <i>Rhizophora mangle</i> ) perturbado y gleysoles en el Río Chumpán, Camp. como indicadores.....	44
de influencia marina sobre el continente.....	44
Figura 14.- Manglar negro ( <i>Avicennia germinans</i> ) el borde litoral acumulativo, en el oriente de la.....	45
Laguna de Términos, Camp. ....	45
Figura 15.- Pastos marinos ( <i>Thalassia testidum</i> ) en el litoral interno de Isla del Carmen, Camp.....	45
Figura 16.- Primera secuencia de terrazas fluviales holocénicas jóvenes y fluvisoles en las planicies .....	46
fluvio-palustres adyacentes en el río Palizada, Camp. ....	46
Figura 17.- Delimitación preliminar de las unidades del paisaje costero en la interfase marina .....	48
de la Laguna de Términos, Camp.....	48
Figura 22.- Distribución de las estaciones de muestreo en la Laguna de Términos, Camp. ....	49
Figura 18.- Análisis de conglomerados para establecer afinidades ambientales entre estaciones de muestreo.....	52
del cuerpo de agua en la Laguna de Términos, Camp. ....	52
Figura 19.- Polígonos de Thiessen trazados según la red de estaciones de muestreo acuático en.....	53
la Laguna de Términos, Camp. ....	53
Figura 20.- Distribución de la salinidad promedio en la Laguna de Términos, Camp.,.....	54
en la época seca del año. ....	54
Figura 21.- Distribución de la turbidez en la Laguna de Términos, Camp., según su reflectancia.....	55
Figura 22.- Esquema de la organización jerárquica de las unidades del paisaje costero. ....	57
Figura 23.- Unidades del paisaje costero en la Laguna de Términos, Camp. ....	61
Figura 24.- Conectividad del paisaje costero en la Laguna de Términos, Camp. ....	72
Figura 25.- Oscilación de las perturbaciones dentro del sistema ecológico.....	78
Figura 26.- Caracterización de la dinámica espacio-temporal del régimen de perturbaciones. ....	80
Figura 27.- Grid reclasificado del cruce de las clasificaciones parciales de la cobertura vegetal entre 1991 y 2001,.....	84
en la zona centro-occidental de la Laguna de Términos, Camp. ....	84
Figura 28.- Índice de modificación de la cubierta vegetal para la Laguna de Términos, Camp., en dos periodos 1974-1991 y 1991-2000. ....	88
Figura 29.- Etapas en la determinación del índice de modificación de la cubierta vegetal por unidades del paisaje.....	90
Figura 30.- Falso color infrarrojo cercano (1980, 1990 y 2001) y cambios en la morfología litoral de la.....	96
Laguna de Términos, Camp. ....	96
Figura 31.- Boca Chica-Palizada en la zona sur-occidental de la Laguna de Términos, Camp. ....	97
Figura 32.- Boca del Carmen-Zacatal en la zona occidental de la Laguna de Términos, Camp. ....	98

Figura 33.- Estero Sabancuy la zona nor-oriental de la Laguna de Términos, Camp.....	99
Figura 34.- Flujograma de la metodología para evaluar la susceptibilidad del terreno ante la ocurrencia de huracanes.....	102
Figura 35.- Mosaico de videografía mostrando el efecto de <i>overwash</i> entre Sabancuy e Isla Aguada, Camp.....	103
Figura 36.- Marco conceptual de la susceptibilidad del terreno ante la ocurrencia de una amenaza natural. ....	106
Figura 37.- Curva de Hjulstrom reinterpretada. ....	112
Figura 38.- Movilidad de la marea de tormenta sobre perfiles de playa típicos y pendiente submarina adyacente.....	115
Figura 39.- Rasgos sedimentarios y morfológicos asociados a la energía de los huracanes en costas arenosas.....	116
Figura 40.- Tipo de impacto por huracanes, procesos físicos asociados y afectación según el tipo de ambiente costero. ....	119
Figura 41.- Zonificación de la susceptibilidad del terreno ante la ocurrencia de huracanes en la Laguna de Términos, Camp. ....	124

## **INTRODUCCIÓN**

El estudio de la zona costera en México, y en general a nivel mundial, es tan amplio como diversas y complejas son las interacciones entre los procesos naturales y la dinámica de las sociedades humanas. Son frecuentes los estudios puntuales y aislados sobre aspectos naturales o socioeconómicos, y pocos los que integran ambos aspectos. En el presente trabajo, se proponen criterios eco-geográficos y metodológicos para el estudio integral de la estructura del paisaje costero a partir de la interacción entre las interfases continental y marina. Se desarrolla un enfoque teórico particular desde la perspectiva de la ciencia del paisaje, para interpretar y evaluar la realidad ambiental específica de las entidades territoriales costeras. Al mismo tiempo, se fundamenta la utilidad de evaluar cualitativa y cuantitativamente los cambios naturales e inducidos (procesos antrópicos) a través de unidades del paisaje y geoindicadores, como herramientas para el diagnóstico ambiental del estado de conservación de los recursos ambientales disponibles en un territorio, cada vez más demandado y, por lo tanto, más impactado por las actividades humanas en México.

Se calcula que a principios del siglo XX vivían en las zonas costeras del mundo, a menos de 100 km de distancia del mar, aproximadamente el 25% de la población, mientras que en la actualidad se considera que es el 53%, esto se debe principalmente a que los países en vías de desarrollo han tenido que buscar los recursos que el océano les ofrece. En México a finales de 1995, 12.7 millones de habitantes vivían en localidades costeras por debajo de los 50 msnm, lo que equivale al 20.9% de la población urbana total (Gutiérrez y González, 1999). Estas cifras muestran que es hasta hace una década que se ha revertido la ocupación tardía de las costas de principios del siglo XX. Las actividades turísticas, petroleras y comerciales han sido los detonadores económicos y del crecimiento poblacional, sobre todo en la costa atlántica, donde los flujos migratorios se han incrementado hacia ciudades como Tampico, Coatzacoalcos, Villahermosa, Ciudad del Carmen, Mérida y Cancún (Gutiérrez y González, 1999).

La mayoría de estas ciudades no se sostienen sólo del uso de las riquezas del mar, ya que también desarrollan actividades agropecuarias y forestales, así como turísticas y comerciales. Este conjunto de presiones son especialmente complejas para la zona costera del Estado de Campeche y, en particular, para el estudio de caso de este trabajo, la Laguna de Términos (Área de Protección de Flora y Fauna), donde se encuentra una importante

riqueza ecológica y económica real y potencial. En términos económicos su importancia es estratégica, ya que en su zona económica exclusiva adyacente, se produce el 79.5% del petróleo y el gas nacional (INEGI, 2003). Ocupa el primer lugar nacional en pesca de caracol y robalo, el segundo en cazón y pulpo, y el quinto en captura de camarón en mar abierto (SAGARPA-CONAPESCA, 2002). En los humedales del suroeste de Campeche se impulsó la agricultura del arroz en los 1980`s, y hasta 1997 fue el tercer productor nacional con 67,753 ton, después de Veracruz y Sinaloa (ASERCA, 1997).

Igualmente en cuanto al valor ecológico y de servicios ambientales, la Laguna de Términos destaca dentro los humedales costeros tropicales a nivel nacional. Alberga el 27% de los manglares del país en buen estado de conservación. Por su extensión cubierta con vegetación hidrófila (16 %) ocupa el segundo lugar nacional después de Tabasco. De las 111 especies de flora acuática y subacuática reportadas para México, 45 se encuentran en los pantanos de Tabasco y Campeche (Lot *et al.* 1986). Tiene un amplio mosaico de asociaciones vegetales terrestres y acuáticas, tales como, vegetación de dunas costeras, manglares, vegetación de pantano, selva baja inundable, palmar inundable, matorral espinoso inundable, matorral inerme inundable, vegetación riparia y selva alta-mediana, además de pastos marinos, hidrófitas enraizadas de hojas flotantes, hidrófitas enraizadas sumergidas e hidrófitas libremente flotadoras. Se registran 84 familias y 374 especies de flora, de las cuales cuatro tienen estatus de protección especial, tres catalogadas como amenazadas (*Bletia purpurea*, *Bravaisia interregina* y *Bravaisia tubiflora*) y una en peligro de extinción (*Habernaria bractescens*). Todas estas asociaciones componen una alta diversidad florística y de hábitats críticos que son, a su vez, sitios de refugio y reproducción de innumerables especies animales acuáticas y terrestres.

El área de estudio se ubica sobre los 19° de latitud norte y los 92° de longitud oeste en la costa sur-suroeste, del Estado de Campeche entre los poblados de Sabancuy y Atasta. Cubre una franja costera de 30 km de ancho que incluye ambientes continentales y marinos (Fig. 1). Hacia el continente se extiende 25 km en dirección perpendicular a la línea de costa, según el nivel máximo de inundación marino–continental. Dentro de esta zona, los primeros 15 km hacia el interior, comprenden el área de influencia directa de la interfase marina, definida principalmente por la presencia de planicies palustres de influencia supramareal; los restantes 10 km incluyen humedales dulceacuícolas ecológica y antropogénicamente interconectados con el área de influencia directa. El límite marino se extiende 5 km hacia el mar y comprende puntos de resurgencias, dispersión de taninos, pastos marinos y sedimentos de origen terrígeno-calcáreo, en movimiento constate por corrientes litorales.

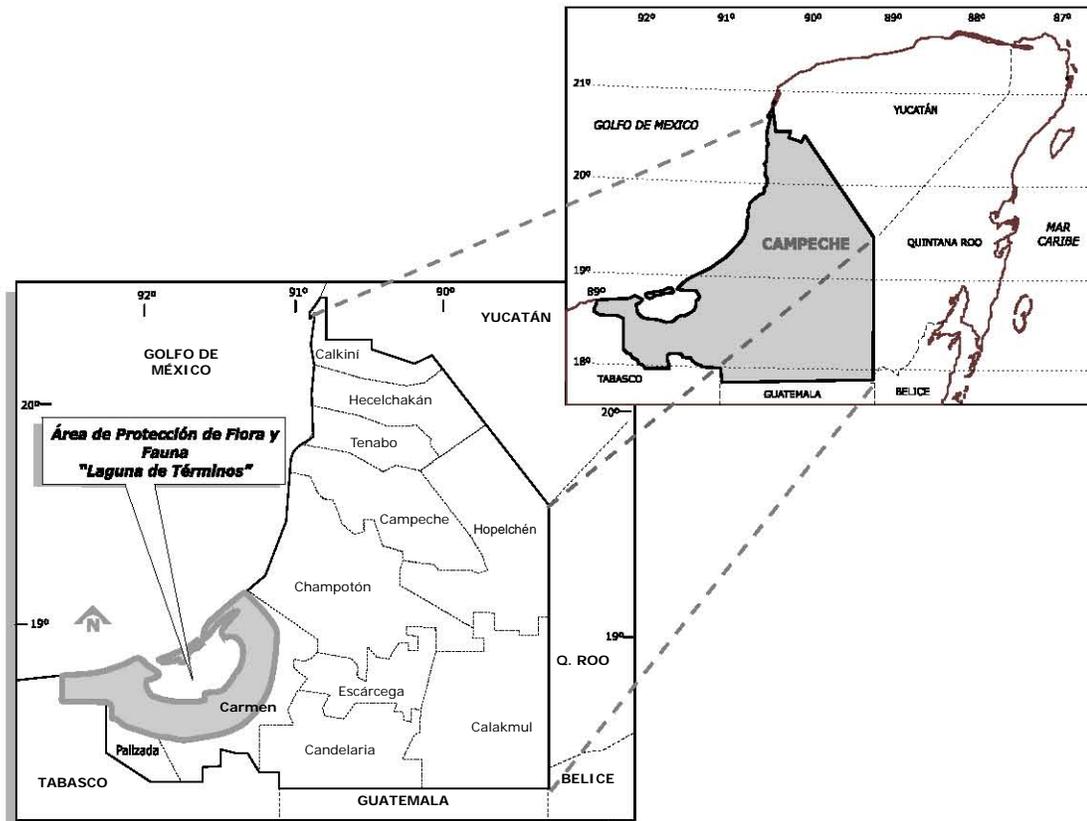


Figura 1.- Ubicación del área de estudio en el Estado de Campeche.

### *La zona costera y la ciencia del paisaje*

Aunque existen definiciones de índole espacial sobre las fronteras y dinámica de la zona costera, en realidad no se ha planteado explícitamente como se vinculan y afectan mutuamente los ecotonos o interfases (continentales y marinas) que la componen. Generalmente se muestran unidades del paisaje con límites propiamente terrestres o totalmente marinos, omitiendo el trazo de fronteras y unidades de interacción entre los ambientes acuáticos, subacuáticos y terrestres.

Para entender el territorio costero a través de la interacción de sus partes o entidades espacio-temporales de ámbitos, tanto terrestres como acuáticos, se enfoca su estudio a través de la ciencia del paisaje y su metodología. Esta, *landschaftskunde* o *landscape science*, como la denominó, por primera vez Carl Troll (citado en Naveh y Lieberman, 1993), inició su desarrollo desde finales del siglo XIX dentro un campo transdisciplinario. El concepto está integrado por la palabra "land" (Tierra), que en esta connotación se refiere a las interacciones verticales y horizontales de los diversos componentes de un ecosistema, y "scape" a la escena o vista como entidad territorial (Velásquez y Bocco, 2003). Sin embargo, tradicionalmente ha venido siendo aplicada casi exclusivamente a paisajes terrestres, por lo que es evidente que también debe incluir y aplicarse a las interfases acua-terrestres o

anfibia y a los ambientes acuáticos mismos (Etter, 1991).

Para acotar la pertinencia de las adecuaciones de la ecología del paisaje al entendimiento de la dinámica y la expresión espacial de las unidades del paisaje costero, se desarrolla el primer capítulo. En este se proponen lineamientos teóricos propios de las unidades del paisaje costero, para caracterizar su funcionamiento y complejidad territorial, utilizando principios genéticos, de homogeneidad relativa, variables clave y de particularidades funcionales, propias de la interacción costera. Se enfatiza la importancia del concepto de conectividad, no como medida de la movilidad de especies entre parches, sino como la ausencia o presencia de vínculos funcionales entre interfases.

La metodología que guía el análisis espacial de este trabajo se basa en los aportes más importantes de la teoría de sistemas y de la escuela europea de la ciencia del paisaje, esencialmente en el enfoque territorial integral de interacciones topológicas y corológicas orientadas hacia planificación ecológica. Se utilizan sistemas jerárquicamente ordenados de unidades del paisaje como los planteados por Bertrand (1968), a los cuales se les incorporan conceptos y métodos ecológicos y de estadística espacial de la escuela norteamericana (Forman y Godron, 1986), para la mejor comprensión del paisaje costero. Se incluyen tres fases de análisis: preliminar, de campo y final, incorporando el procesamiento de imágenes de sensores remotos, su validación en campo, la medición de relaciones de conectividad costera a través de matrices de correlación, el estudio multitemporal de la fragmentación del paisaje costero, la estabilidad de la línea de costa y el uso de variables ponderadas de susceptibilidad del terreno ante la ocurrencia de huracanes.

Independientemente del enfoque o percepción de las escuelas en ecología del paisaje, el reto en la actualidad es, como señala Hobbs (1997), utilizar sus conceptos y teorías en aplicaciones del mundo real, donde las perturbaciones naturales y/o antrópicas ocasionan cambios morfológicos y funcionales, que reducen, dañan o incluso eliminan las potencialidades de los recursos naturales disponibles.

En el segundo capítulo, a partir del enfoque metodológico antes mencionado, se proponen variantes de los principios genéticos y estructurales del paisaje para delimitar las fronteras de las unidades costeras. Para establecer un análisis acorde a la naturaleza de los ambientes, las metodologías se dividen en interfase continental e interfase marina. Así, en la interfase continental se utilizan métodos para identificar objetivamente los elementos indicadores (bióticos y abióticos) de la influencia marina hacia el continente, y en el ambiente marino, métodos y técnicas orientadas a caracterizar la influencia de la dinámica ecogeográfica continental sobre la interfase marina. Se proponen metodologías alternas para la delimitación de fronteras, sobre todo en la interfase marina.

### *Ecología del paisaje y diagnóstico ambiental*

Para la zona costera se han propuesto innumerables formas de evaluación puntual de los disturbios con indicadores aislados, generalmente no extrapolables, en espacios abiertos indistintos y sin seguimiento histórico local. Para contribuir a la solución de estas limitantes y aportar herramientas para la toma de decisiones, por parte de autoridades locales y federales, se propone el uso de geoindicadores de expresión territorial, como guías para la identificación rápida de problemas de modificación o perturbación significativos en espacios de interacciones costeras.

El concepto de geoindicador, fue propuesto originalmente por Berger, en 1996,, como una herramienta para el diagnóstico ambiental. En el tercer capítulo de este trabajo, se proponen adaptaciones del concepto a la zona costera dentro de parámetros y umbrales definidos, referentes y validados localmente, conceptualmente extrapolables, de uso comprensible y, sobre todo, dentro de fronteras funcionales de homogeneidad relativa. Se desarrollan tres geoindicadores: modificación de la cubierta, detección de cambios en la morfología litoral y susceptibilidad del terreno ante la ocurrencia de huracanes. Los dos primeros, de origen mixto (natural y antrópico) y, el tercero resultado de la combinación entre la fragilidad natural de los paisajes costeros y su respuesta ante la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos extraordinarios (huracanes).

En la situación ambiental antes expuesta, la presión económica estratégica de la actividad petrolera y el valor ecológico de los humedales costeros se contraponen en objetivos. Sin embargo, si se identifica y caracteriza la trascendencia de los impactos ambientales puntuales o generalizados en el conjunto del funcionamiento del sistema costero, se entenderá cuando éstos pueden amenazar, tanto el potencial natural como económico de los recursos costeros, en la Laguna de Términos. Campeche. Identificando los niveles de perturbación a nivel diagnóstico, se pueden tomar decisiones de manejo acertadas, si éste se concibe como la gestión planificada de las decisiones sobre el territorio.

Salvo en el caso que se señale, la construcción de índices, métodos y geoindicadores son aportes originales de este trabajo. Con estos se pretende interpretar la información eco-geográfica disponible sobre la zona costera desde una perspectiva espacial, para el diagnóstico ambiental rápido por unidades del paisaje costero.

## CAPÍTULO I

### **I.- ECOLOGÍA DEL PAISAJE COSTERO. CONCEPCIÓN TEÓRICA**

El concepto de zona costera tiene tantas definiciones como áreas del conocimiento existen. Pueden centrar su importancia en el estudio de sus elementos naturales, su funcionamiento ecológico o su problemática económica, dependiendo de enfoques geológicos, biológicos, conservacionistas, socio-económicos o político-administrativos.

Todos los enfoques son válidos en su ámbito, sin embargo, la comprensión del funcionamiento y dinámica integral de la zona costera, se basa en su concepción natural, considerando primordialmente los elementos bióticos, abióticos y funcionales del paisaje según sus ambientes acuáticos, subacuáticos y terrestres. Estos elementos son transformados por el uso antrópico, modificando sus características originales y conformando nuevas unidades del paisaje con nuevas características y fronteras. A partir de las diferentes formas de apropiación humana se han generado innumerables propuestas de límites físico-geográficos y antrópicos de zona costera, sin embargo, son generalmente aproximaciones parciales de la realidad, debido a la ausencia de principios de integridad funcional y de interacción entre las interfases marina y continental. Es incluso notoria, la ausencia de este principio en los planes de manejo y ordenamiento costeros.

Por lo anterior y basados en el enfoque sistémico propio de la ciencia del paisaje, se conceptualiza el paisaje costero como una unidad con límites funcionales de características únicas, que requiere de principios conceptuales y metodológicos propios. Para poner en perspectiva la concepción paisajística de la zona costera en su forma más completa, se refieren algunos conceptos de índole natural como marco de referencia.

Sorensen *et al.* (1990), la definen como la interfase tierra-océano que presenta dos principales ejes, el primero, paralelo a la línea de costa y, el segundo, perpendicular a la misma. Es decir, la conceptualizan como el espacio resultado de dos dominios o dimensiones ambientales.

Ray, en 1991, introduce conceptos precisos de las particularidades de la estructura espacial en la zona costera. Resalta que los ecosistemas costeros presentan gradientes ecológicos que producen condiciones de frontera. Estos gradientes son de cuatro tipos: fisiográficos, biogénicos, climáticos y físico-químicos. Cada uno de estos enmarcados en una dinámica espacio-temporal. Igualmente desde el punto de vista hidrológico y geomorfológico, Ray (*op cit.*) señala que es un área en la cual las conexiones entre masa, energía y biota son más

fuerzas en dirección transversal que en dirección longitudinal a la línea de costa. En función de estas conexiones la zona costera comprende dos sistemas y cinco componentes:

*Sistema terrestre*

- a) Tierras altas.- de topografía compleja, importantes por sus aportes de agua dulce.
- b) Planicie costera.- áreas de agua dulce restringidas por el mar, superficies cubiertas por sedimentos recientes que ahora están por encima del nivel del mar.
- c) Tierras de inundación.- sitios delimitados por tierras salinas y mareas.

*Sistema marino*

- a) Aguas intracostas.- es el área del mar resguardada por la línea costera de marea baja. Está permanentemente cubierta con agua y las arenas de la playa oscilan dentro de ella con el cambio de las condiciones de las olas.
- b) Aguas intercostas.- unidad compleja que puede ser subdividida por las características de las masas de agua y la batimetría.

Los gradientes costeros y los ecotonos tienen una amplia variedad de condiciones jerárquicas espaciales con asociaciones bióticas características. Al nivel jerárquico mayor, le corresponden asociaciones equivalentes a los biomas terrestres. En la zona costera se puede hablar, por tanto, de biomas de tierras inundables, planicies costeras y estanques neríticos (Ray, 1991).

Brown (1997) se inclina por el enfoque funcional, señalando que la zona costera: "es el espacio en el cual el ambiente terrestre influye sobre el ambiente marino y viceversa", o sea que la considera un área de transición funcional entre estos ambientes.

Windevoxhel *et al.* (1998) describen la zona costera como el espacio geográfico en el cual los principales intercambios de materia y energía se producen entre ecosistemas terrestres y marinos.

Ibarra (1998), señala que el Programa Internacional Geosfera-Biosfera, en su reporte 33 (*IGBP, International Geosphere-Biosphere Programme*), considera que esta zona se extiende desde las planicies costeras hasta el límite exterior de la plataforma continental, coincidiendo con la región inundada de manera alterna durante las fluctuaciones del nivel del mar desde finales del Cuaternario. Dentro de dicho programa, el proyecto Interacciones Tierra-Océano en la Zona Costera (*LOICZ, Land Ocean Interactions in the Coastal Zone*), establece de manera convencional que la zona costera queda comprendida entre los 200 metros por encima del nivel medio del mar y hasta los 200 metros por debajo de este nivel.

Todos los conceptos antes señalados tienen como percepción común de zona costera, la interrelación entre ambientes marinos y continentales dentro de un espacio geográfico común. Sin embargo, en la práctica no incluyen los lineamientos teóricos para establecer fronteras y vínculos integrales de unicidad. Por lo anterior y con el fin de conceptualizar la zona costera, desde un punto de vista incluyente, se caracteriza el paisaje, según la visión de la ciencia del paisaje.

## **I.1.- Concepción paisajística de la zona costera.**

Desde la perspectiva de la ciencia del paisaje, la zona costera es un espacio de ecotonos o gradientes eco-geográficos que aparecen ordenados jerárquicamente de manera natural en franjas y secciones, y son resultado de la interacción funcional entre elementos bióticos y abióticos, tanto marinos como continentales. Estos gradientes se basan en la coexistencia y mutua influencia entre interfases continentales y marinas, en donde sus elementos no presentan límites abruptos sino más bien graduales o de transición, a menos que exista algún elemento con mayor peso específico que provoque condiciones abruptas de frontera. La expresión corológica de las interfases en el paisaje costero y sus ámbitos de influencia recíproca, constituyen la unidad funcional típica o representativa del complejo sistema costero (Fig.2).

La interfase continental cubre la extensión territorial terrestre adyacente a la línea de costa promedio, donde existen evidencias ecológicas directas o indirectas de la influencia del ambiente acuático marino. Por otra parte, la interfase marina limita hacia el ambiente epinerítico (U.S. Bureau of Mines, 1996), o de pendiente submarina de plataforma continental, convencionalmente no mayor a 37m de profundidad, donde los ambientes continentales adyacentes muestran influencia ecológica directa o indirecta. La integridad y diferenciación espacial del paisaje costero se debe fundamentalmente a las regularidades observadas entre los elementos de sus interfases terrestres, subacuáticas y acuáticas.

En el ámbito de influencia costera, la organización espacial o estructura del paisaje está condicionada por el emplazamiento de los elementos del paisaje, su funcionamiento y los ritmos evolutivos de los cambios ecológicos (Fig.2). Los aspectos relevantes de la estructura, funcionamiento y temporalidad del paisaje costero se desarrollan en apartados subsecuentes.

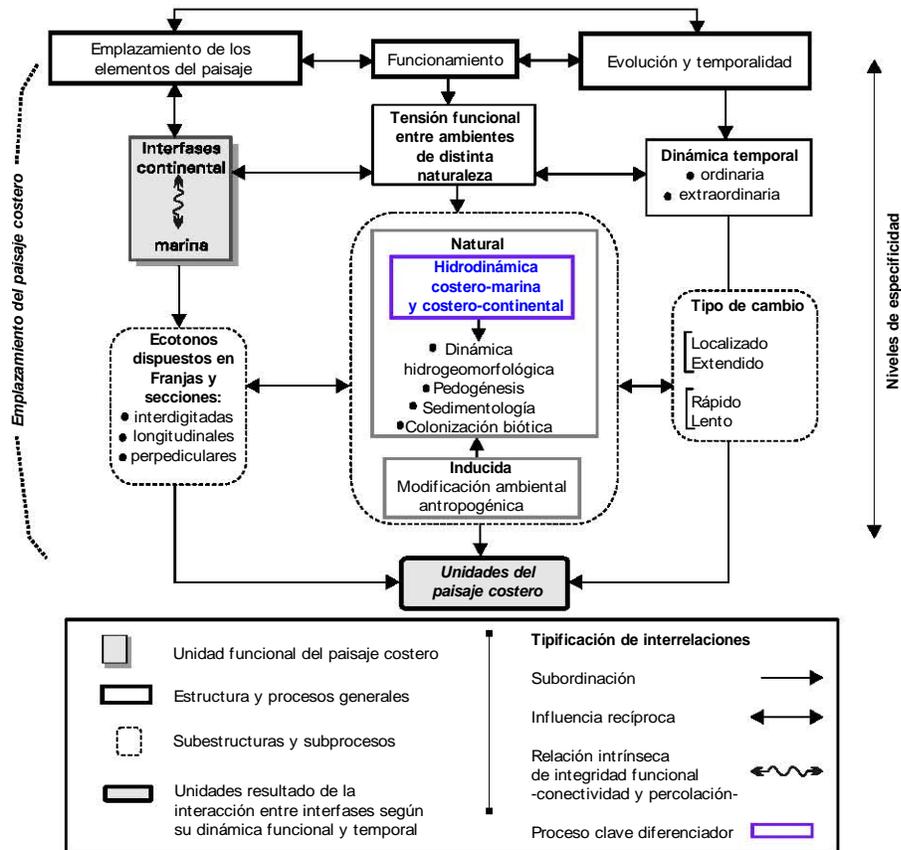


Figura 2.- Estructura y funcionamiento del paisaje costero.

### I.1.1.- Emplazamiento de los elementos y estructura del paisaje costero.

El emplazamiento territorial es un concepto geográfico que explica las causas de la posición relativa de los elementos del paisaje. Este es resultado de uno o varios sistemas de relaciones, que dependen de la evolución dialéctica entre los elementos del paisaje y el balance de correspondencias entre localización y posición. La localización describe la ubicación de un objeto bajo un sistema de referencia, en cambio la posición se basa en un sistema de relaciones entre los elementos del paisaje que se traduce en su expresión espacial o estructura del paisaje. Su discretividad espacial está condicionada por las propiedades contingentes o que pertenecen naturalmente al lugar y las realizables, producto de las actividades humanas.

La estructura espacial de las costas es resultado de un complejo sistema de relaciones en el que las geoformas vivas (reflejo vigente de la dinámica del sistema) y las geoformas heredadas (restos de antiguas líneas costeras que se expresan en depósitos y formas erosivas) son controladas en su dinámica por flujos hidrológicos. Esto debido, en primera instancia, a que el paisaje costero es resultado del contacto entre ambientes acuáticos y terrestres, y a que el mar es finalmente el nivel de base general de todos los aportes de agua continental. Para el

paisaje costero es propiedad contingente la interdependencia entre geoformas costeras y flujos hidrológicos, debido a que a partir de ésta se subordinan procesos físicos, químicos y biológicos. Autores como Forman (1995) señalan que los flujos hidrológicos, entre otros, son considerados procesos claves (*key process*), porque a partir de ellos se generan procesos físicos, químicos y biológicos. Kwakernaak (citado por Zonneveld, 1995) igualmente distingue las variables clave de las dependientes, señalando entre las clave, la morfometría del relieve dado que reflejan las condiciones del microrrelieve y del flujo hidrológico.

A partir de la propiedad contingente geoformas-flujos hidrológicos, se identifican fronteras espaciales de influencia recíproca denominadas interfases continental y marina. En este espacio se encuentran aguas continentales y marinas, originando gradientes en la distribución vertical (estratificación), transversal y longitudinal, tanto de los elementos físico-químicos del agua, como de los suelos o sustratos y biota asociada. Esta combinación determina los grados o niveles de conectividad y percolación (Fig. 2) y condiciona el arreglo estructural y dinámica de las unidades del paisaje costero, sobre todo en ambientes estuarinos, planicies deltaicas, lagunas costeras, marismas, planicies costeras bajas, planicies de cordones litorales y humedales costeros. Dentro de las interfases continental y marina, los flujos hidrológicos regulan la productividad primaria, los tiempos de residencia del agua, el grado de influencia mareal (prisma de marea), la magnitud de los flujos fluviales y el transporte litoral.

Para caracterizar el emplazamiento del paisaje costero, en este trabajo se propone el uso de franjas y secciones de gradientes eco-geográficos, como unidades básicas de la estructura del paisaje, diferenciables espacialmente, tanto por su fisonomía como por su funcionamiento. Pueden presentar posiciones y bordes de formas diversas dependiendo de la intensidad de la relaciones entre las interfases y se basan en el concepto ecológico de ecotono. Los ecotonos son zonas de transición entre sistemas ecológicos adyacentes con características únicas, definidas por escalas espacio-temporales y por la fuerza de las interacciones entre ellos (Holland, 1988). Los flujos de materia y energía dentro de los ecotonos pueden ser unidireccionales o bidireccionales y la fuerza o tensión con la que se presentan, determinan el contraste entre unidades colindantes. Se asume, que debido a la complejidad de sus interrelaciones son altamente susceptibles a cambios ambientales y que por lo mismo son indicadores tempranos de perturbación.

Las características más relevantes de los ecotonos presentes en el paisaje costero son (Cuadro 1):

**Cuadro 1.- Principales características de los ecotonos en el paisaje costero**  
(parcialmente basadas en Holland 1988 y Farina, 1998).

<b>Definiciones</b>	Sitios en los cuales se presentan los más altos intercambios de materia y energía	
	Zonas de transición entre diferentes hábitats	
	Zonas de tensión entre sistemas con diferente madurez y dinámica ecológica	
	Unidades de alta diversidad biológica debido a la transición entre ambientes continentales y marinos	
	Filtros que acumulan o dejan pasar materia y energía	
	Zonas de interacción entre ambientes de distinta naturaleza (acuática y terrestres)	
<b>Variables funcionales</b>	La inundabilidad es propiedad contingente fundamental en los ecotonos costeros	
	La conectividad y la percolación son vínculos funcionales entre ambientes de distinta naturaleza	
	Difusión pasiva, movimiento de baja energía de un lugar de alta concentración a otro de baja	
	Difusión activa, movimiento masivo de alta energía de un lugar de alta concentración a otro de baja	
	Filtro o barrera, frontera del paisaje que restringe u obstaculiza el tránsito de materia y energía	
	Acumulación, adición constante de materia o energía	
	Sumidero, colector donde se pierde materia o energía	
	Hábitat, espacio donde se desarrollan, se reproducen y mueren naturalmente los seres vivos	
	Estabilidad, grado en que los ecotonos resisten cambios bajo estrés	
	Resiliencia, promedios bajo los cuales los ecotonos regresan a su condición inicial después de una perturbación	
	Contraste funcional, extensión de la diferencia en las variables funcionales sobre el ecotono entre ambientes acuáticos, subacuáticos y terrestres.	
<b>Clasificación</b>	Naturales, creados y mantenidos en funcionamiento por mecanismos internos o naturales	
	Seminaturales, coexisten elementos de origen natural y antrópico y funcionamiento parcialmente natural	
	Antrópicos, creados o mantenidos en funcionamiento por mecanismos externos o antrópicos	
<b>Escala espacio-temporal:</b>		
<b>Espacial</b>	Forma regular o irregular.- asociada a la génesis y dinámica natural o inducida en las unidades del paisaje	
	Tamaño	Micro.- hábitats, facies o nichos ecológicos de entre cm y metros, escalas grandes, locales
		Meso.- unidades del paisaje de homogeneidad relativa a escalas medias, regionales
Macro.- sistema planetario de ecotonos costeros a escalas pequeñas		
<b>Temporal</b>	Longevos.- los que muestran evidencias evolutivas previas al Cuaternario	
	Permanentes.- muestran poca o nula variabilidad a lo largo del año en fisonomía y funcionamiento	
	Estacionales.- aparecen en regiones donde los cambios estacionales son notorios y condicionan la dinámica espacio-temporal de los ecotonos	
	Extraordinarios.- resultado de eventos o fenómenos extraordinarios que modifican temporal o permanentemente la morfodinámica y funcionamiento costeros	

Todas las características antes señaladas se pueden presentar en otros ambientes, pero son típicas y claramente identificables en los paisajes costeros. Nos permiten soportar conceptual y funcionalmente las fronteras de las unidades del paisaje, que tendrán finalmente diferente naturaleza genética y espacio-temporal. Reflejan patrones espaciales de homogeneidad relativa, dependiendo de la escala, la variedad eco-geográfica y extensión de las interfases y los ritmos de sus intercambios.

De esta forma para ambientes costeros acumulativos de baja energía donde son mas evidentes las interacciones, se presentan las siguientes franjas y secciones de formas y amplitudes diversas caracterizables según su emplazamiento y la tensión de los intercambios de materia y energía entre planicies intermareales, humedales costeros y ambientes epineríticos (Fig. 3).

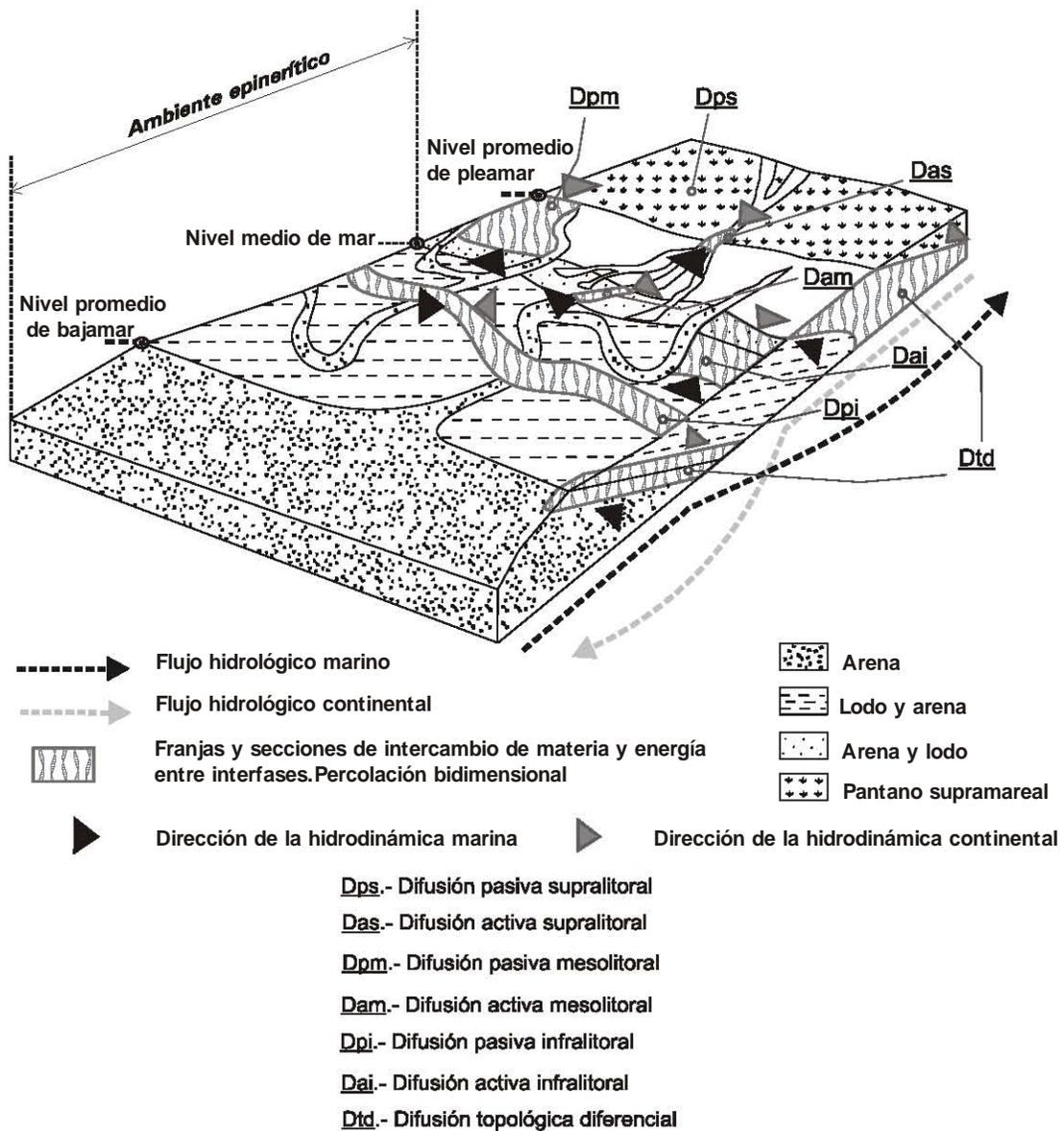


Figura 3.- Arreglo espacial de las unidades del paisaje costero.

▪ Difusión pasiva supralitoral (Dps).- se encuentran limitadas por la parte superior de la costa que queda sumergida durante las pleamares de los equinoccios. Intensamente afectadas por temporales como huracanes y tormentas de verano o invierno, ocasionando periodos alternos de inmersiones y emersiones. Presentan poca energía hidrodinámica salvo en temporales. Ambientes predominantemente sedimentarios, donde se mezclan terrígenos con sedimentos marinos.

▪ Difusión activa supralitoral (Das).- producto de procesos fluviales y fluvio-palustres influenciados por el régimen intermareal extraordinario. Corresponde con la hidrodinámica fluvial de estuarios altos y medios,

donde se presenta deriva estacional de la mezcla vertical de aguas dulces y salinas. Cuando hay presencia de cuña salina, sus efectos en superficie se exteriorizan por capilaridad (suelos salino-sódicos). En lluvias de temporal o mareas vivas, los caudales rebasan los albardones e invaden lagunetas de crecida y planicies fluvio-palustres.

- Difusión pasiva mesolitoral (Dpm).- corresponde con las porciones del territorio litoral afectadas por el régimen ordinario de mareas. Comprende las aguas intracosteras entre pleamares y bajamares, playas secas y húmedas y estuarios bajos. Puede presentar franjas subacuáticas en regiones macromareales de pendientes litorales extendidas y planas.

- Difusión activa mesolitoral (Dam).- en ambientes mesomareales ( $> 2m - < 4m$  de oscilación intermareal) y macromareales ( $> 4m - < 6m$  de oscilación intermareal) los espacios intermareales presentan importante actividad hidrodinámica. Son típicos los canales de marea, secciones estuarinas de mezcla de constante aguas (dulces y salinas) y deltas de reflujo.

- Difusión pasiva infralitoral (Dpi).- estanques epineríticos en espacios acuáticos abiertos no afectados por oleaje. Máxima profundidad litoral. Compatible con fanerógamas marinas, algas fotófilas y fitobentos (pastos marinos).

- Difusión activa infralitoral (Dai).- estanques epineríticos en espacios acuáticos abiertos afectados por oleaje y corrientes litorales (deriva y resaca).

- Difusión topológica diferencial (Dtd).- debido a la percolación entre flujos acuáticos continentales y marinos se establece una estratificación vertical de los parámetros fisicoquímicos del agua. Dependiendo de su importancia en volumen y densidades de sus componentes se formarán cuñas de intrusión uni o bidireccional en la vertical superior o inferior.

La presencia relativa de cada franja o sector mantiene relaciones intrínsecas de conectividad o contigüidad a través de un borde (*edge*, su equivalente en inglés). El borde es dinámico y puede ser transicional, abrupto o difuso. A medida que se incrementa la escala, el borde se vuelve más difuso y, por lo tanto, menos claro. El conjunto de bordes configura el conjunto estructural del sistema de franjas y secciones en el paisaje costero y tienen características particulares, como su variabilidad temporal según la tensión entre flujos hidrodinámicos continentales o marinos. Reflejan características fisonómicas, estructurales y de la dinámica físico-geográfica del territorio de cada unidad del paisaje y pueden ser:

- Permanentes visibles
- Permanentes intangibles inferidas
- Temporales estacionales u ordinarias y
- Temporales extraordinarias

Son permanentes visibles cuando los vínculos funcionales tienen un ritmo de ocurrencia promedio repetible en periodos de tiempos cortos y espacios bien delimitados, o bien son resultado de la sucesión ecológica continua del paisaje durante el Cuaternario. Se establecen a partir de los elementos visibles del paisaje que muestran contraste ambiental. Pueden ser lineales continuas o discontinuas o dispuestas en franjas o secciones. Rompen con la continuidad u homogeneidad relativa de un continuo territorial. Son parte habitual de la visual del paisaje. Los bordes pueden ser lineales o irregulares, pero generalmente identificables por cambios abruptos en la fisonomía del paisaje.

Las permanentes intangibles inferidas son aquellas fronteras no evidentes en superficie, pero que inciden directa o indirectamente en la distribución de los elementos del paisaje. Los niveles de inundación subsuperficial o la cuña salina en la interfase continental son, entre otros, algunos ejemplos de cómo, a pesar de no verificar visualmente su existencia, inciden en el desarrollo de los suelos y la vegetación. Los bordes tienden a ser difusos.

Las temporales estacionales son resultado de las variaciones espaciales periódicas en el comportamiento de los elementos del paisaje. Algunas tienen comportamientos predecibles (mareas) y otras esperables dentro de ciertos rangos de variación (época de lluvias, secas y nortes). Presentan importantes cambios resultado de los regímenes climáticos, hidrológicos y, por lo tanto, de la actividad biológica. Igualmente son de carácter ordinario, porque son esperables en periodos de tiempo definidos y repetibles.

Finalmente, las temporales extraordinarias tienen significancia espacial cuando ocurren eventos extraordinarios (naturales o antrópicos) que cambian la fisonomía o incluso la estructura y funcionamiento del paisaje. Dependiendo de la intensidad del evento pueden presentarse cambios funcionales, incluso a nivel de intra e interpaisaje, ocasionando que las fronteras permanentes o estacionales se extiendan sobre espacios habitualmente no ocupados por las interfases.

### **I.1.2.- Funcionamiento.**

Funcionalmente el paisaje costero se caracteriza por mantener estrechas relaciones de conectividad y percolación entre ambientes contiguos de diferente naturaleza y dinámica. La conectividad es resultado de los vínculos funcionales o conexiones entre franjas y/o unidades del paisaje de distinta naturaleza (acuática y terrestre)

y la percolación de los procesos ecológicos azarosos, extendidos y de diversas intensidades, que tienden a cubrir sectores colindantes entre unidades del paisaje contiguas. La percolación se define también a partir de la tensión o estado de dominancia recíproca entre elementos y flujos de distinta naturaleza y estado de madurez. La teoría de la percolación se formuló para describir el comportamiento de los fluidos difundidos en medios heterogéneos y aleatorios (Burel *et al.*, 2002) y considera la comunicación entre dos sitios susceptibles de intercambiar información localmente (De Gennes, 1990). Puede tratarse de porosidades para la difusión de los fluidos o de manchas de recursos favorables al desplazamiento de organismos vivos, individuos o poblaciones (Burel *et al.*, 2002).

Estos dos conceptos, conectividad y percolación, están estrechamente vinculados y se determinan mutuamente. Se puede afirmar, que en el paisaje costero, sin percolación no hay conectividad y viceversa, y que ambos procesos se presenta sobre una franja de amplitud variable, donde el conjunto de elementos que la caracterizan, cambian constantemente dentro de ciertos umbrales eco-geográficos.

Tradicionalmente el concepto de conectividad es conocido como la medida de cuan conectadas o espacialmente continuas se encuentran las estructuras del paisaje (matrices, corredores o parches). Merriam (citado en Zonneveld, 1985) introdujo un importante concepto al respecto: "es un parámetro de la interconexión de elementos funcionalmente relacionados de un paisaje y el movimiento de las especies entre ellos". Es un concepto cuantitativo o cualitativo que se mide relacionando el número de rupturas o interrupciones por unidad de distancia (Forman y Godron, 1986). Establece el grado de conexión física entre parches (Farina, 1998) y es un atributo estructural del paisaje susceptible de ser mapeado (Baudry, 1984) en clusters por grados, desde espacios bien conectados, hasta zonas muy fragmentadas donde la conectividad es mínima. Incluso, se han desarrollado índices como el gamma y el alfa para establecer valoraciones numéricas de conectividad. El gamma mide el número de vínculos emergentes o visibles en un área específica y el alfa el número de circuitos o flujos que estructuran la red dentro de la misma área.

En el paisaje costero el concepto de conectividad está asociado a la extraterritorialidad funcional entre interfases de distinta naturaleza y a los procesos ecológicos verticales y horizontales que las vinculan. La característica fundamental de estos procesos es que son notoriamente controlados por la dinámica hidrológica continental y marina, por lo que es considerada un factor funcional clave del emplazamiento de los elementos del paisaje y, por lo tanto, de la organización territorial del paisaje costero.

Los procesos ecológicos actúan diferencialmente en intensidades, flujos y volúmenes, tanto en la dimensión corológica (interrelación horizontal entre elementos y unidades del paisaje) como en la topológica

(interrelación vertical en capas o estratos). Sin embargo, la mayor parte de la dinámica y los flujos que le dan una identidad particular al paisaje costero están determinados por las relaciones corológicas o espaciales, es decir, por el flujo de materia y energía entre unidades del paisaje de distinta naturaleza, pero en vecindad. Estas unidades colindantes pueden funcionar como difusoras activas o pasivas, emisoras, filtros o acumuladoras de materia y energía. Según su dimensión de acción corológica, los procesos más evidentes y representativos son: geomorfológicos (morfogénesis y morfodinámica de zonas inundables fluvio-marinas), hidrológicos (escorrentías concentradas y difusas, régimen de mareas, deriva litoral, oleaje, estratificación salina, tiempo de residencia del agua y turbidez), bióticos (movilidad y colonización de especies vegetales y animales), clima costero y antrópicos (fragmentación, deforestación, contaminación, construcciones rígidas no permeables o mal ubicadas).

A partir de la identificación de los elementos de las unidades del paisaje, de su arreglo espacial (estructura) y de la amplitud territorial de los procesos ecológicos que determinan la interrelación entre sus interfases, las relaciones de conectividad pueden ser amplias o reducidas (contraste funcional). Esto dependerá de la amplitud horizontal de los procesos ecológicos que las mantengan unidas funcionalmente y de los elementos del paisaje indicadores. Los elementos y procesos se pueden identificar objetivamente o de forma indirecta, a través de parámetros ambientales físicos, químicos y biológicos.

En la figura 4, se representan dos situaciones típicas de la amplitud y contraste de conectividad costera y algunos parámetros fisicoquímicos, bióticos y geomorfológicos de uso frecuente en la definición de sus fronteras, como el ambiente morfogenético, la productividad primaria, la vegetación, la turbidez y la salinidad.

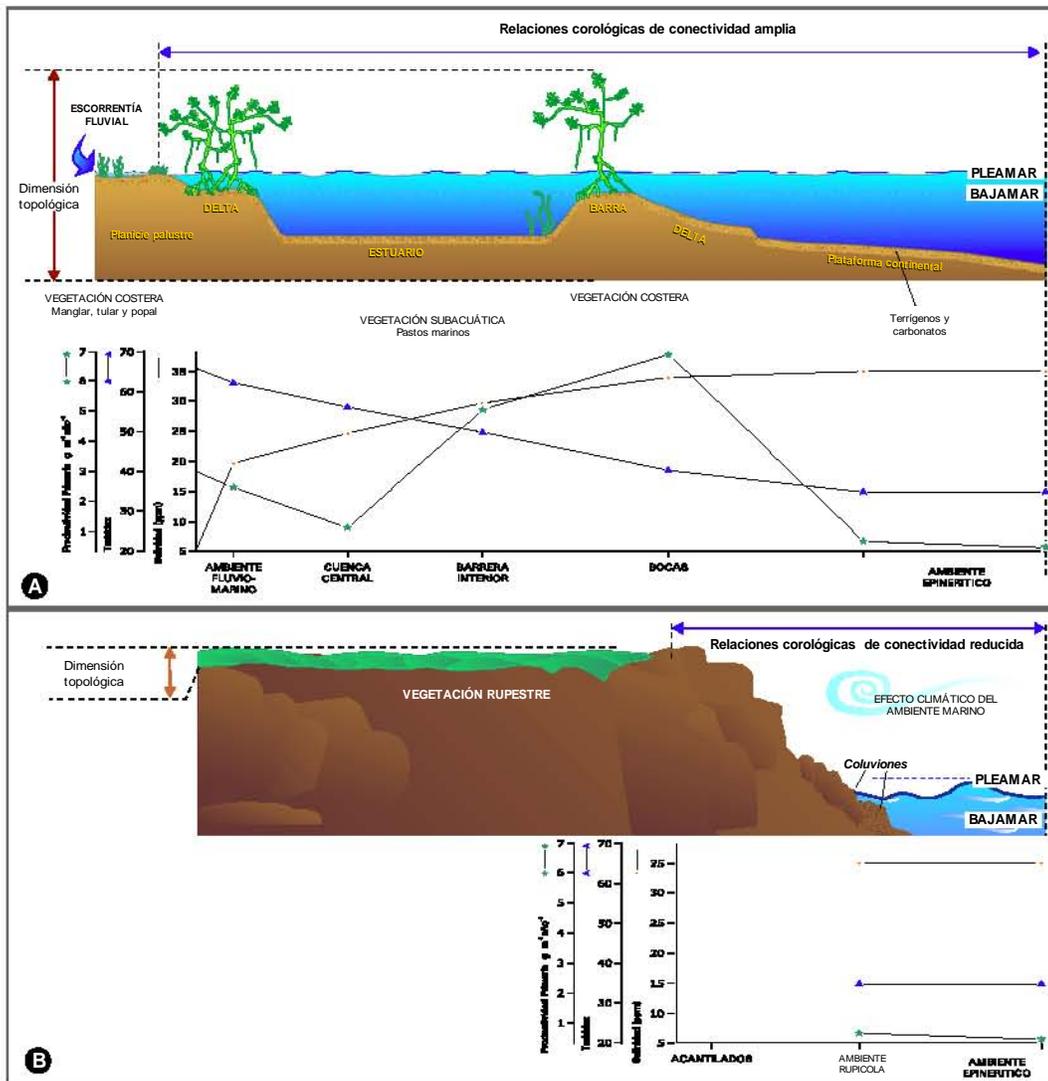


Gráfico A, parcialmente basado en Yañez-Arancibia et al. , 1988

Figura 4.- Representación teórica de relaciones corológicas de conectividad en dos tipos de zona costera. A.- Planicie fluvio-palustre extendida (amplia) y, B.-Acantilados costeros (reducida).

La concepción de relaciones corológicas de conectividad amplia (Fig. 4 A) corresponden con un alto grado de conectividad, debido a la presencia de elementos eco-geográficos compartidos por ambas interfases. Tienen amplias extensiones territoriales, poco contraste altitudinal (decenas de msnm sobre decenas de kilómetros en la horizontal), pendientes extendidas (< de 5° de pendiente) y sólo conciben su funcionamiento, a partir del vínculo funcional entre interfases. Presentan franjas y sectores con especializaciones eco-geográficas bien diferenciables como los ambientes limnéticos, estuarinos, litorales, deltaicos e intermareales. Por el contrario, si las relaciones corológicas de conectividad son reducidas, el espacio de interacción es restringido y se infieren menos elementos de

las interfases interactuando (Fig. 4 B). En este tipo de relaciones sólo se establecen relaciones de vecindad con reducidos espacios de interacción. Regularmente existe un importante contraste altitudinal (decenas de msnm sobre decenas de metros en la horizontal) y pendientes abruptas ( $> 15^\circ$ ).

Las especies vegetales del litoral rocoso, evolucionan a lo largo del tiempo y adquieren adaptaciones para vivir en estos hábitats rupícolas y fisurícolas, donde la influencia del salitre marino y del viento condicionan las características ambientales. En la zona más próxima al nivel del mar, la sal es transportada por el viento, disuelta en pequeñas gotas de agua, que se depositan sobre toda la franja litoral. Las plantas que viven en esta franja tienen que soportar fuertes concentraciones salinas en el suelo y en el ambiente.

### **I.1.3.- Evolución natural e inducida.**

En términos evolutivos geológicos, el paisaje costero es el más joven y dinámico de los paisajes, en cuanto a la variabilidad y geodinámica de sus fronteras. Las zonas costeras en su morfogénesis y morfodinámica han sido afectadas por cambios drásticos, debidos a las glaciaciones (transgresiones y regresiones marinas), la neotectónica y la subsidencia, desde el Pleistoceno superior (11,000 años) hasta la actualidad. Son los únicos paisajes que han resentido en forma directa, las fluctuaciones eustáticas y sus efectos eco-geográficos durante el Cuaternario. Incluso, actualmente el ascenso del nivel del mar representa para las zonas costeras bajas un impacto de considerable importancia en términos tanto ecológicos como humanos. Se espera que durante este siglo exista un acelerado aumento del nivel del mar, resultado del cambio climático inducido por el hombre (Warrick *et al.*, 1996). La estimación más aceptada es de 50 cm. entre 1990 y 2100, con un significativo grado de incertidumbre. Sus principales efectos en la zona costera serán: incremento de la erosión, inundaciones, pérdida de humedales costeros, transgresión marina sobre zonas costeras bajas, y salinización del suelo y aguas subterráneas, entre otros impactos (Bijlsma *et al.*, 1996).

Los cambios o secuencia de estadios evolutivos, tanto fisonómicos como funcionales en el paisaje costero, pueden ser: según su origen, naturales o inducidos por el hombre, según su recurrencia temporal, ordinarios o extraordinarios y según su expresión espacial, localizados o extendidos. Los cambios naturales tienen que ver con la dinámica ecológica (equilibrio dinámico) intrínseca del paisaje. Se pueden presentar en periodos de evolución gradual ordinaria o a través de rupturas extraordinarias del equilibrio del sistema, generalmente asociadas a eventos o fenómenos naturales extraordinarios (huracanes, erupciones volcánicas, erosión acelerada etc.). El origen y

periodicidad de los cambios se puede medir en función de la magnitud o extensión territorial de sus efectos. Así, los cambios localizados abarcan áreas restringidas por fenómenos o procesos puntuales (cordones litorales, playas, planicies palustres, etc.) y los extendidos tienen expresión subregional y regional (cuencas, subcuencas, humedales costeros, etc.). Las perturbaciones naturales extraordinarias siempre tienen un impacto directo sobre la configuración de las fronteras originales de las unidades del paisaje costero, y su capacidad de recuperación depende de su elasticidad ecológica o resiliencia.

Por otra parte, las modificaciones inducidas por las actividades antrópicas originan cambios drásticos e inesperados en el sistema y amplifican los efectos modificadores de algunos fenómenos naturales. Las perturbaciones humanas con frecuencia inhabilitan la capacidad de recuperación de los paisajes. En particular, el paisaje costero es especialmente sensible a las perturbaciones, debido a la gran cantidad de interacciones entre los ambientes acuáticos y terrestres que se dañan o interrumpen. Por esto es que bajo diferentes esquemas de modificación humana, los cambios en la cubierta y la alteración de flujos superficiales y subsuperficiales tienen un impacto considerablemente mayor sobre los elementos estructurales costeros, que sobre ambientes propiamente terrestres o acuáticos. Al pasar de una modificación mínima a una modificación alta, los impactos positivos se convierten gradualmente en matrices de impactos negativos (Corlay, 1993) con la subsecuente influencia sobre las unidades del paisaje con las que comparten fronteras (acuáticas, subacuáticas y terrestres).

Debido a la importancia de los flujos entre interfases, los usos intensivos en la interfase continental generan nuevas unidades difusoras activas que generan impactos inmediatos en la salud ambiental de la interfase marina. Las matrices de uso intensivo se extienden en la interfase terrestre y ocasionan cambios sobre la configuración natural los corredores (ecotonos) que circunscriben el paisaje costero. El factor humano de mayor impacto son las estructuras rígidas (canales, diques, terraplenes, carreteras y espigones) entre interfases. Estas generalmente sustituyen el estado de percolación natural extensivo por flujos concentrados con calidades ecológicas y volúmenes distintos. Con frecuencia se cambian los flujos laminares por flujos concentrados u obstruidos, redundando en efectos ambientales directos e indirectos sobre los paisajes, como hipersalinización, pérdida del balance sedimentario (erosión), degradación de hábitats críticos y muerte de la vegetación costera, entre otros. Igualmente obstaculizan el principio de membrana filtradora propia de los humedales costeros (pantanos y manglares).

Según lo anterior, el paisaje costero tiene como unidad funcional de origen las unidades paisajísticas de intercambio (franjas y secciones) basadas en el principio de interacción ecológica de los ecotonos en su expresión

espacial (interfases continental y marina). Su complejidad radica en el número de interacciones entre los elementos bióticos y abióticos de los ambientes terrestres, acuáticos y subacuáticos, así como de su expresión espacial visible y funcional.

## **I.2.- Índice de conectividad costera.**

Los índices en ecología del paisaje son valores cuantitativos o cualitativos que revelan el comportamiento, cualidad o funcionamiento de uno varios elementos de un sistema en un espacio y momento dado. Aunque en la actualidad todavía se cuestiona la confiabilidad y utilidad de los índices en ecología del paisaje (Tischendorf, 2001), en el presente trabajo sólo se utilizan como umbrales normalizados que permiten medir de manera objetiva y versátil la intensidad de los vínculos funcionales entre las interfases de la zona costera.

Para reducir inconsistencias, el índice de conectividad funcional del paisaje costero propuesto en este trabajo, considera las siguientes condiciones:

- En un índice ideal los valores medidos deben estar distribuidos dentro del rango total de valores potenciales.
- Deben incluir los diferentes niveles de conexión topológica y corológica.
- Usa parámetros de conectividad afines en comportamiento espacio-temporal (época climática, diurno, mensual, etc.), evitando mezclar datos u observaciones que arrojen resultados inconsistentes o sin correlación directa.
- Los índices se construyen entre unidades del paisaje contiguas o dentro de distancias, donde se verifique la conectividad.
- Las conexiones pueden ser uni o bidireccionales y tienen diferentes pesos específicos en la construcción del índice.
- La aplicabilidad del índice depende del proceso o fenómeno de interés. Existen los que demuestran conectividad integral y los que se refieren a un fenómeno o proceso específico.
- En su concepción general el índice se aplica a todos los ambientes costeros.
- A diferencia de la conectividad medida a través de distancias euclidianas, en este índice se consideran los procesos identificables de difusión corológica entre interfases.

Para determinar las relaciones potenciales de conectividad costera, el índice explica, a partir de los elementos y flujos vinculantes entre interfases, la complejidad de su interacción funcional. Se construye sobre un sistema corológico y jerárquico de unidades del paisaje contiguas, que son expresión cartográfica de las interfases continental y marina de ambiente costeros específicos. A cada par de unidades contiguas representativas de las interfases, se les asocia una matriz de conectividad (Cuadro 2), donde se identifican por tipo, los procesos, variables y elementos del paisaje, que revelan relaciones significativas de conectividad entre interfases. A partir de la matriz, se establece cuantitativa y cualitativamente cuán relacionadas están las interfases en las unidades del paisaje

costero, permitiendo establecer grados de conectividad a partir de las intensidades en vínculos eco-geográficos y flujos de materia y energía. Se proponen las relaciones de difusión corológica para describir la influencia o presencia relativa del ambiente marino sobre el continental (M-C) y viceversa (C-M).

Los vínculos pueden ser uni o bidireccionales entre interfases y se incluyen según su presencia o ausencia o según las variantes en sus intensidades. Pueden tener umbrales cuantitativos o cualitativos que indican la presencia relativa de una característica propia de una interfase presente en la otra y viceversa. Por ejemplo, un rango de salinidad, turbidez, productividad primaria o facie sedimentaria típica de una interfase, se puede presentar en la contigua haciendo evidente la conectividad eco-geográfica.

La ecuación conceptual del índice se establece a partir del registro sistemático de indicadores que tienen expresión espacial significativa para dos franjas o sectores contiguos, i y j:

$$IC = \frac{\sum (X_i, X_j)}{X_{max}}$$

Donde IC = índice de conectividad

$X_i, X_j$  = relaciones presentes entre dos franjas o sectores contiguos

$X_{max}$  = número máximo de relaciones posibles entre franjas o parches contiguos.

La presencia de todos los vínculos potenciales tendrá valor de 1. Por debajo de este número se establecen rangos desde alta, media, baja y hasta muy baja (o de autonomía relativa) conectividad, según la mayor o menor presencia de vínculos eco-geográficos. Existen variables y elementos se evalúan según su presencia o ausencia, con 1.0 o 0.0 respectivamente, mientras que otros incluyen grados relativos de conectividad, según la naturaleza e intensidad del vínculo; se clasifican en alto ( $> 0.66$ ), medio (entre 0.33 y 0.66) y bajo ( $< 0.33$ ). En todos los casos, se consideran las variables estadísticamente significativas y de expresión espacialmente verificable.

Cuadro 2.- Relaciones de conectividad entre unidades contiguas del paisaje costero.

Procesos eco-geográficos entre las interfases	Subprocesos y componentes del paisaje costero	Variables asociadas a los subprocesos y elementos del paisaje costero	Modalidad de la influencia	Valores asociados de conectividad		Difusión corológica activa		Índice de conectividad	
				C-M	M-C	C-M	M-C		
Hidrológicos	Físicos	Turbidez (mg/l)	↔	1.0-0.66-0.33	1.0-0.66-0.33	■	■	Alta 0.66-1.0	
		Químicos	Salinidad e intrusión salina (ppm)	↔	1.0-0.66-0.33	1.0-0.66-0.33	■		■
	Ph		↔	1.0-0.00	1.0-0.00	■	■		
	Nutrientes		↔	1.0-0.66-0.33	1.0-0.66-0.33	■	■		
	Hidrodinámicos	Escorrentía fluvial (m³/s)	→	1.0-0.66-0.33	.....	■	■		
		Limnéticos (m/s)	↔	1.0-0.00	1.0-0.00	■	■		
		Marinos	Mareas (m)	←	.....	1.0-0.66-0.33	■		■
Oleaje (m)			←	.....	1.0-0.66-0.33	■	■		
Corrientes litorales	←		.....	1.0-0.66-0.33	■	■			
Bióticos	Vegetación	Hidrofítica (palustre intermareal)	↔	1.0-0.00	1.0-0.00	■	■	Media 0.33-0.65	
		Mesofítica (palustre supramareal)	→	1.0-0.00	.....	■	■		
		De dunas (litoral)	→	1.0-0.00	.....	■	■		
		Macrófitas de zona litoral	↔	1.0-0.00	1.0-0.00	■	■		
	Fauna	Bentónica	Moluscos (spp)	←	.....	1.0-0.00	■	■	
			Corales (spp)	←	.....	1.0-0.00	■	■	
Ecológicos	Productividad primaria (mg/m³)	↔	1.0-0.66-0.33	1.0-0.66-0.33	■	■			
Geomorfológicos	Morfogenéticos y morfológicos	Litoral (marino-palustre)	↔	1.0-0.00	1.0-0.00	■	■	Baja < 0.32	
		Fluvial	Estuarina	↔	1.0-0.00	1.0-0.00	■		■
			Deltaica	←	1.0-0.00	.....	■		■
		Palustre inter y supramareal	↔	1.0-0.00	1.0-0.00	■	■		
Sedimentológicos (Ambientes sedimentarios)	Marino	Plataforma - Facies carbonatadas	→	1.0-0.00	.....	■	■	Muy baja (vecindad sin vínculos funcionales o de vínculos ocasionales o extraordinarios)	
		Intermareal - Llanos fangosos de marea	←	.....	1.0-0.00	■	■		
		Litoral- Playas y barras arenosas submarinas	←	.....	1.0-0.00	■	■		
	No marino	Terrestre- Dunas	→	1.0-0.00	.....	■	■		
		Lacustre- Facies lacustres	→	1.0-0.00	.....	■	■		
	Transicional	Deltaico- Arenas transgresivas basales (terrigenos)	↔	1.0-0.00	1.0-0.00	■	■		
		Deltaico- Frentes deltaicos submarinos (proluviones)	↔	1.0-0.00	1.0-0.00	■	■		
Estuarino (aluviones)		↔	1.0-0.00	1.0-0.00	■	■			
Pedológicos	Pedogenéticos	Paludización (continental o marina)	↔	1.0-0.66-0.33	1.0-0.66-0.33	■	■		
		Gleyzación hidromorfismo intermareal	↔	1.0-0.00	1.0-0.00	■	■		
		Salinización (capilaridad o lixiviación)	←	.....	1.0-0.00	■	■		
Espaciales	Vecindad	Adyacencia (m)	↔	1.0-0.66-0.33	1.0-0.66-0.33	■	■		

Influencia recíproca	↔
Influencia mar-continente	←
Influencia continente-mar	→

Cada paisaje costero presentará más o menos vínculos dependiendo de la amplitud y complejidad corológica entre sus interfases, franjas y sectores. Como ejemplo de la forma en que se organiza la información en una matriz tipo, se muestra el caso de los humedales costeros de origen fluvio-palustre del tipo de la Laguna de Términos, Campeche, en donde se han identificado 6 tipos de procesos, 12 subprocesos asociados y 32 variables o elementos del paisaje, que permiten establecer vínculos o relaciones potenciales de conectividad entre interfases.

Los parámetros o características distintivas que indican presencia relativa de la influencia de las interfases, que se identifican en la mayoría de los humedales costeros y ambientes estuarinos y que autores como Cowardin *et al.* (1979) y Roggeri (1995) han registrado en la literatura.

Los vínculos potenciales se basan en los principales elementos transmisibles entre los humedales costeros y el ambiente marino, que son principalmente: la dinámica de la red hidrológica, el balance entre flujos de agua, según su origen y destino, los indicadores bióticos, los niveles de agua mínimos y máximos que regulan su funcionamiento, la calidad del agua y la movilidad de los nutrientes y sedimentos.

La descripción general de los criterios de conectividad, incluyendo sus umbrales cuantitativos o cualitativos, se muestran en el siguiente cuadro (Cuadro 3):

Cuadro 3.- Descripción general y umbrales de medición de las variables de conectividad en el paisaje costero.

<b>Variables asociadas a los subprocesos y elementos del paisaje costero</b>	<b>Descripción general</b>	<b>Umbrales</b>
Turbidez	Condicionada por la carga de sedimentos transportados por flujos de agua continentales o marinos. Terrígenos o carbonatos, que en su caso, condicionen el origen y distribución de la turbidez.	0.03 - 0.05 mg/l
Salinidad	Cuando rangos de salinidad propios de un ambiente están presentes en otro, incluyendo los rangos de transición esperados para ambientes estuarinos o deltaicos.	0.05-34.0 ups
pH	Las aguas dulces tienen el pH entre 6.5 y 8.7; las aguas marinas entre 8 y 8.5 con sus respectivos rangos intermedios.	6.5- 8.7 pH
Nutrientes	La proporción mayor de nitrógeno total y menor de fósforo de las aguas continentales, contrasta con mayores cantidades de fósforo y menores de nitrógeno total en el mar. Sin embargo los cambios en las concentraciones son más evidentes en las diversas formas de nitrógeno (amoníaco, nitratos y nitritos)	0.2- 3.64 $\mu\text{g at/l}$
Hidrodinámicos	Los volúmenes de escorrentía fluvial que concurren en el mismo sistema costero permiten inferir áreas de influencia proporcional sobre ambientes de transición y marinos.	0-16 -9.8 $10^9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
	Los regímenes de marea regulan fundamentalmente los niveles de inundación costeros y condicionan la conectividad marino costera.	0-0.30-0.90 m
	El oleaje condiciona tanto la morfología litoral como la dinámica ecológica de los hábitats litorales. (altura promedio y extrema en m).	Presencia o ausencia
	Las corrientes de fondo, arrastre y deriva litoral son condiciones hidrodinámicas diferenciadoras	0.1-1.83 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Vegetación	El tipo de vegetación muestra preferencia por emplazamientos específicos que reflejan la geodinámica de los ambientes continentales de transición o marinos.	Presencia o ausencia
Fauna	Condicionados por la salinidad los gasterópodos y pelecípodos (bivalvos) presentan alta de diversidad de taxas en ambientes con influencia marina y menor hacia el continente.	Presencia o ausencia
Morfogenéticos y morfológicos	La morfogénesis y la morfología (geofomas) son indicadores de la geodinámica costera y reflejan grados de influencia relativa entre los ambientes continentales y marinos.	Presencia o ausencia
Ambientes sedimentarios	La naturaleza y abundancia relativa de los sedimentos refleja la geodinámica de los ambientes de depositación y el emplazamiento de las unidades del paisaje.	Presencia o ausencia
Pedogenéticos	Paludización.- se presenta en áreas deposicionales y origina histosoles o gleyzoles hísticos. Diferenciar si la materia orgánica es de origen continental, marino o de transición.	> al 30 % de materia orgánica
	Gleyzación.- inundación semipermanente de origen continental o marina	Reducción en los primeros 50 cm del suelo
	Salinización.- si se debe a capilaridad por intrusión salina o la lixiviación en cubetas de decantación por estrés hídrico.	Conductividad eléctrica mayor de 15 $\text{dS/m}$ a 25° C en alguna época del año
Índice de adyacencia	Se define según la ecuación propuesta por Van Smaalen (1996) transformada a porcentaje : $IA(X,Y) = P(X,Y) / P(X)$ ,Siendo: $IA(X,Y)$ = Índice de adyacencia de la unidad X con la unidad Y $P(X,Y)$ = perímetro común total entre las unidades X e Y $P(X)$ = perímetro de la unidad X	0-100 % Porcentaje de perímetro compartido

## **CAPÍTULO II**

### **II.- DELIMITACIÓN DE LAS UNIDADES DEL PAISAJE COSTERO.**

La delimitación de las fronteras paisajísticas en zonas costeras, está determinada por las características físico-geográficas de sus interfases, la tensión funcional entre ambientes de distinta naturaleza y la escala del levantamiento. Cada ambiente costero presenta, dependiendo de su evolución morfogenética, dinámica geocológica y elementos bióticos y abióticos, propiedades emergentes o visibles que permiten inferir sus fronteras o bordes. La correlación diferencial entre éstos, dará origen a una variedad de patrones espaciales que reflejan el funcionamiento de las interfases del paisaje.

La identificación de unidades del paisaje en los humedales costeros tropicales del área de estudio, en Laguna de Términos, Campeche, se basa principalmente en la variedad de ecotonos condicionados por la variabilidad (diaria, estacional y extraordinaria) en la permanencia de las inundaciones, las fuentes y receptáculos de agua, la distancia a éstos, y la dirección, volumen y mezcla de los flujos de agua y sedimentos marinos y continentales. En este contexto, el emplazamiento hidrogeomórfico será el elemento clave del paisaje que regulará los gradientes ecotonales, que condicionan el hidromorfismo y semihidromorfismo en los suelos, la posterior respuesta biótica a estas condiciones y la colonización vegetal por especies tropicales hidrofíticas, mesofíticas y de macrófitas litorales.

A partir de la caracterización de los componentes y de la dinámica geo-ecológica de las unidades del paisaje, se ordenan primero, en forma preliminar, las unidades del paisaje por jerarquías, según la información disponible y la escala del trabajo de investigación. Posteriormente, se verifican en campo estas fronteras para finalmente establecer el arreglo espacial de las unidades del paisaje costero, incluyendo sus interfases continental y marina.

#### **II.1.- Metodología.**

Para establecer las fronteras de las unidades del paisaje se utiliza el análisis integrado para el levantamiento ecológico. Es la concepción teórico-metodológica de la ecología del paisaje, a partir de la cual se generan una serie de criterios, reglas, ponderaciones y procedimientos analíticos, que permiten establecer sistemáticamente el arreglo espacial y jerárquico de las unidades del paisaje. El método está orientado a discernir,

con claridad, los factores y procesos ecológicos relevantes, a partir de los cuales se puedan inferir vínculos funcionales de conectividad topológica y corológica en espacios de homogeneidad relativa. Dentro de todas las posibles interacciones, se puede hablar del carácter esencial de variabilidad promedio delimitada espacialmente, en comparación con las fluctuaciones intrínsecas puntuales de sus componentes. Esto significa que, aunque existan innumerables evidencias de procesos ecológicos locales, siempre se podrán establecer fronteras espaciales basadas en abstracciones, donde existan comportamientos funcionales o elementos dominantes generalizables (propiedad celular o azonalidad del paisaje).

El análisis integral inicia con un modelo conceptual, que incluye los componentes bióticos y abióticos representativos del ambiente costero y las relaciones funcionales corológicas significativas que, en términos espaciales, permitan delimitar las fronteras de las unidades del paisaje costero. En el siguiente flujograma se muestran las etapas a seguir (Fig.5).

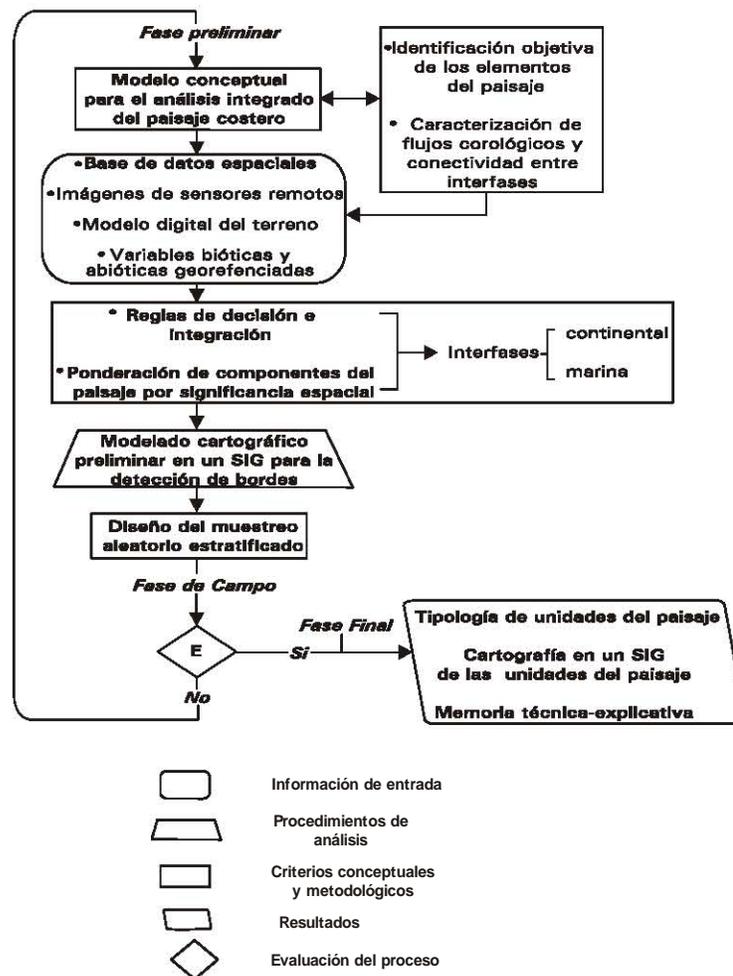


Figura 5.- Etapas de la metodología para la delimitación de unidades del paisaje costero.

Cada ambiente costero incluirá, según sus particularidades ambientales, flujos corológicos representativos de la conectividad entre interfases. Tanto a nivel fisonómico como funcional las relaciones de conectividad corológica tienen distinta complejidad, intensidad y amplitud, según el tipo de ambiente costero.

A partir del modelo conceptual, se evalúan los requerimientos de información espacial para delimitar, en una fase preliminar, las unidades del paisaje costero, según la escala de la investigación y los métodos de análisis disponibles. A partir de este análisis preliminar, se diseña la estrategia para el muestreo de campo, que es siempre estratificado en función del conocimiento previo de la estructura del paisaje costero.

Debido a la diferente naturaleza de los ambientes continentales y marinos de las interfases, se seleccionan reglas específicas de decisión e integración para caracterizar el emplazamiento de las unidades del paisaje y la conformación de sus fronteras o bordes. Es decir, dentro del concepto de integridad del paisaje costero y debido a su complejidad, siempre será necesario considerar particularidades funcionales para los ambientes asociados a las interfases.

### **II.1.1.- Modelo conceptual.**

El modelo conceptual explica el emplazamiento de las unidades del paisaje o porciones del territorio costero, a partir de las relaciones topológicas y corológicas entre los componentes de las interfases continental y marina. En éstas se caracterizan atributos fisonómicos y funcionales claves o diferenciadores, a partir de los cuales se trazan fronteras o bordes, que delimitan unidades del paisaje para cada tipo de ambiente costero. Ante su amplísima diversidad natural a nivel planetario, es necesario establecer un modelo conceptual único, con sus propios elementos bióticos y abióticos, y sus propias relaciones funcionales topológicas y corológicas. Según lo anterior, el modelo propuesto en este trabajo es una contribución original aplicable sólo al área de estudio o a ambientes similares.

La Laguna de Términos, en Campeche, se enmarca ambientalmente dentro de un ecosistema de humedales costeros tropicales de zonas bajas acumulativas, con una heterogeneidad ambiental alta, debido a la complejidad de interacciones hidrodinámicas entre ambientes fluviales (deltaico-estuarinos), lacustres, palustres y litorales. Desde el punto de vista morfogénico, según Perillo (1995), es un sistema estuarino secundario de tipo restringido. Secundario, porque ha sido modificado en su estructura base original por procesos geomorfológicos erosivo-acumulativos de origen marino y fluvial. De tipo restringido, debido a que la comunicación hidrodinámica entre la laguna costera y el mar se encuentra parcialmente obstruida por una serie de barras litorales (isla barrera del Carmen) dispuestas transversalmente. Por otra parte, desde el punto de vista sedimentológico, se encuentra sobre

ambientes marinos marginales, de planicies bajas intermareales (Boggs, 1995) y fluvio-deltaicos que originan facies sedimentológicas, dispuestas a manera de franjas, a lo largo de un gradiente tierra-mar.

El cuerpo de agua principal de la Laguna de Términos se puede caracterizar como limnético-marino entre salobre-oligohalino (0.5-3.0 ups) y marino-polihalino (mayor de 34 ups) y oligomíctico. Oligohalino, porque dentro de las aguas salobres no rebasa los 3 ups y, marino polihalino, porque en época seca puede superar las 34 ups. Por otra parte, es oligomíctico porque la temperatura se mantiene constante todo el año, con gradientes térmicos débiles (menores de 4° C) y circulación vertical irregular.

La Laguna de Términos presenta una amplia diversidad de humedales costeros de diferentes orígenes, controlados principalmente por el emplazamiento hidrogeomorfológico. En la interfase continental se encuentran humedales de origen marino, intradeltaicos, interfluviales, intermareales y propiamente continentales. La dinámica de los flujos de materia y energía, y su relación con los componentes abióticos y bióticos para el área de estudio se muestran en la figura 6. Cada componente tiene una expresión espacial considerada en mapas analíticos, que reflejan parcialmente la realidad del ambiente costero.

Los elementos del paisaje están ligados funcionalmente por los flujos corológicos, principalmente de tipo hidrológico. De esta correlación surge el arreglo espacial sucesional y ponderado de la tipología de paisajes. Sucesional, porque su integración se inicia con etapas abióticas para continuar con las bióticas y ponderado porque, en función de este orden, los elementos del paisaje tendrán mayor o menor importancia relativa en el arreglo de la estructura del paisaje. Ésta depende de la estabilidad o permanencia de sus fronteras, de su importancia como facilitadores de otros procesos ecológicos no propios, de su orden de aparición en la génesis del paisaje y de su flexibilidad para asociar condiciones de homogeneidad espacial. En este sentido, se inicia con el emplazamiento geomorfológico, se continúa la geodinámica de los ambientes deposicionales, la condición edáfica y al final con la cubierta vegetal, como indicador síntesis del funcionamiento del paisaje.

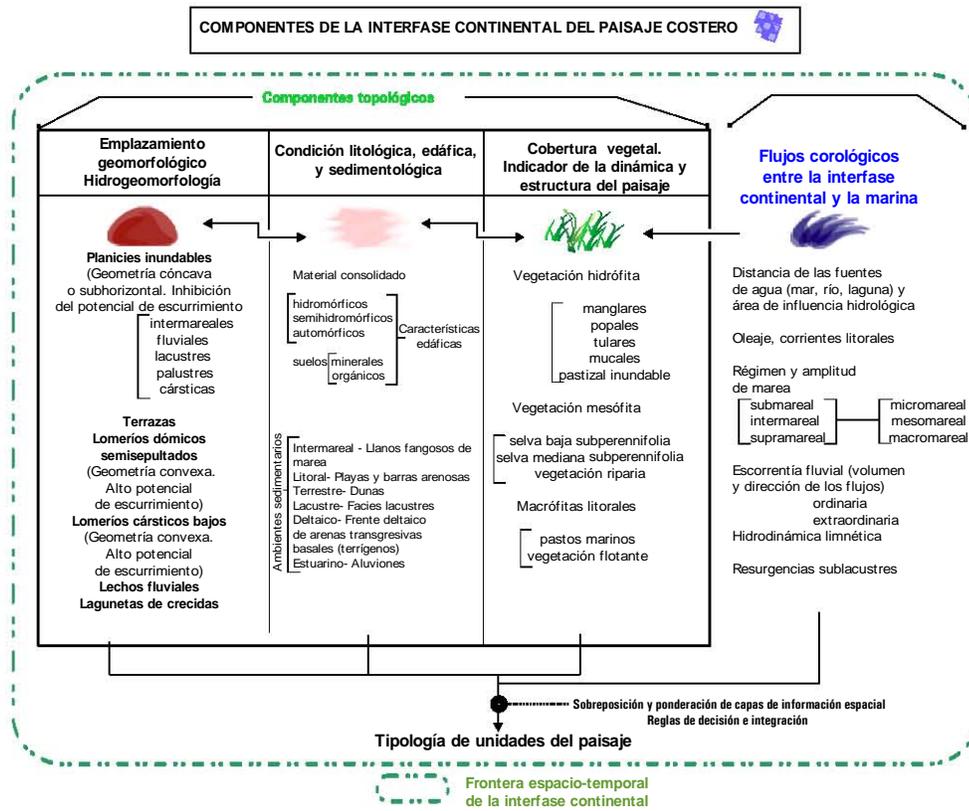


Figura 6.- Modelo conceptual de la interfase continental del paisaje costero.

Por otra parte, la identificación directa de las fronteras paisajísticas en los ambientes acuáticos (interfase marina) presenta dificultades, debido a que muchos de sus elementos bióticos y abióticos no son visibles a través de sensores remotos o son de alta movilidad o variabilidad. La primera visual del paisaje acuático es una masa de agua uniforme sin variaciones aparentes, salvo en su movilidad (olas, corrientes, etc.) inducida por características indirectas, como la turbidez. Sin embargo, al particularizar en los patrones de distribución de las variables físico-químicas, sus movimientos y la biota un su interior, se observan múltiples variaciones verticales, horizontales y temporales. De manera, que al igual que en la interfase continental, se deben acotar los elementos y flujos para la interfase marina en ambientes costeros particulares, como se muestra en la siguiente figura (Fig.7).

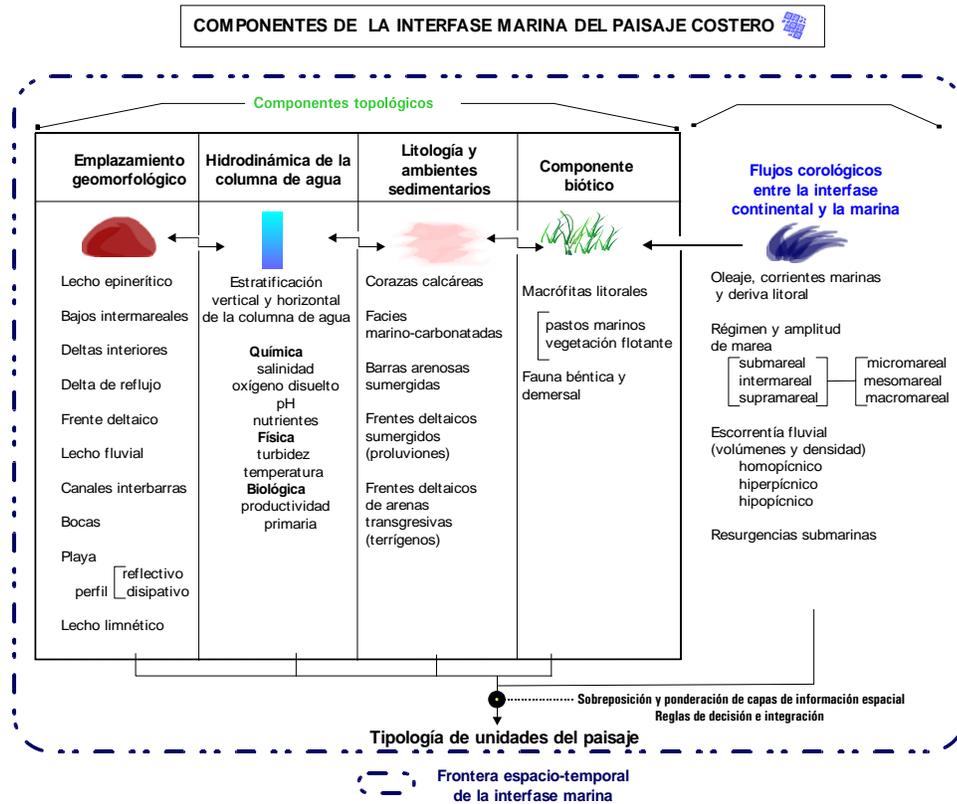


Figura 7.- Modelo conceptual de la interfase marina del paisaje costero.

### II.1.2.- Reglas de decisión e integración.

Las metodologías incluidas en las reglas de decisión y ponderación para una adecuada representación espacial, pueden estar orientadas a objetos o a campos (Fortin *et al.*, 2000, Jacquez *et al.*, 2000) y dependen fundamentalmente del tipo de datos disponibles. La representación a través de objetos se basa en entidades del mundo real coherentes e indivisibles y los campos representan medidas sobre una variable de valores, que varían a través del espacio geográfico. Aunque cada vez es más frecuente el uso de la representación a través de objetos, aún no es de uso generalizado.

A continuación se describen 10 métodos convencionales de uso frecuente en la delimitación de las fronteras de las unidades del paisaje, agrupados en 4 categorías:

- Métodos estadísticos. – estadísticamente un borde puede ser definido como la localización, donde ocurre el más alto promedio de cambio (Burrough, 1986).
  - Desplazamiento y corte por ventanas. – mediante ventanas móviles se generan cortes en segmentos iguales para detectar cambios a lo largo de un transecto. Se busca la disimilaridad entre las mitades adyacentes de dos ventanas

- contiguas de 8 muestras, mediante la distancia euclidiana al cuadrado.
- Delineación por cuadrantes en imágenes. – se utiliza en áreas regulares con información espacial en formato raster. Los bordes se detectan a través de kernels o cuadrángulos de diferentes resoluciones espaciales en píxeles. Johnston y Bonde (1989) proponen para ecotonos un kernel de 3x3 píxeles en índices de vegetación, asignándole a la ventana, el píxel central de mayor diferencia entre el valor más bajo y el más alto.
  - Delineación triangular. – se usa para conectar sitios de muestreo que forman triángulos sobre espacios irregulares. La triangulación de Delunay es la de uso más frecuente, a partir de esta se conforman los polígonos de Voronoi o Thiessen.
  - Delineación categórica. – se basa en la presencia o ausencia de variables semicuantitativas o incluso cualitativas (presencia o ausencia de especies, tipos de suelos, geomorfología, etc.) Este método no define gradientes y transforma la información cualitativa en coeficientes o medidas de disimilaridad.
- Estadística multivariada. – debido a la gran cantidad de datos obtenidos para la caracterización de los ambientes marinos y continentales, es necesario recurrir a la estadística multivariada para encontrar la significancia estadística de uno o varios parámetros del conjunto considerado, así como la forma en la que se agrupan. Esto permite reflejar, en forma objetiva, la contribución relativa de las variables a la dinámica y conformación espacial de las unidades del paisaje.
  - Métodos en percepción remota. – permiten visualizar zonas de transición y detectar los ecotonos basados en la reflectancia electromagnética de la superficie (vegetación, tipo de suelo, textura del suelo, etc.). Su utilidad es amplia, sobre todo, si las imágenes tienen alta resolución espectral y espacial. Se pueden aplicar visualizaciones en compuestos en falso color y subprocesos como el ACP (análisis de componentes principales), Tasseld cap, detección de bordes y filtros.
  - Análisis espacial en sistemas de información geográfica. – conociendo el origen, factores y dinámica de los procesos asociados a los ecotonos se pueden construir modelos espaciales que los incluyan.
- Geoestadística. – procedimientos de estimación y/o simulación de variables distribuidas espacialmente (Chauvet, 1994). A partir de un conjunto de muestras representativas tomadas dentro del dominio en que se manifiesta un fenómeno a estudiar, la geoestadística proporciona valores estimados en localizaciones de interés, que en conjunto presenten iguales características de dispersión, según los datos originales.
  - Modelos digitales de elevación del terreno. – a través de estos modelos en formato raster tridimensional de ubicación y altitud, se elaboran de los modelos geomorfológicos e hidrológicos.
  - Sobreposición y ponderación de capas de información espacial. – es una herramienta que permite evaluar las relaciones entre dos o más variables espaciales, a través de la correlación entre la extensión territorial y los valores

asociados a campos de información.

- Lógica difusa (fuzzy logic). –para reducir la particularidad de la clasificación de las imágenes por homogeneizar áreas y crear bordes abruptos, se emplea la lógica difusa, que permite modelar matemáticamente la naturaleza imprecisa de los bordes. En este método los bordes son áreas o zonas de transición y no líneas.

Los métodos antes descritos, se aplican tanto en la fase preliminar como en la final, según las características físico-geográficas del ambiente costero, la información de entrada y la escala de trabajo. La fase preliminar incluye el análisis de toda la información ambiental disponible e identifica las reglas de decisión y procedimientos de análisis más adecuados para generar un modelo preliminar de fronteras entre unidades del paisaje. Estas fronteras fueron verificadas en campo (fase de campo) con muestreos aleatorios estratificados en función del modelo preliminar. Los ajustes y modificaciones pertinentes, se realizan en la fase final, que requiere la aplicación de procedimientos complementarios para la redelimitación o ajuste de fronteras y la posterior tipificación y jerarquización de las unidades del paisaje costero.

#### **II.1.2.1.-Interfase continental.**

##### **a) Fase preliminar.**

Para la identificación objetiva de los elementos del paisaje se utilizaron diversas fuentes de información y procedimientos de análisis. Sobre la base del modelo conceptual se decidió tomar como factor clave diferenciador la inundabilidad del terreno asociada al emplazamiento hidrogeomorfológico y el tipo de cubierta vegetal.

##### **▪ Delimitación preliminar de las unidades de la interfase continental.**

Como base cartográfica inicial, se utilizó una imagen de alta resolución espacial Landsat TM5 (29 de marzo del 2001), de la época seca, para tener una visión sinóptica de los humedales costeros y un modelo digital del terreno (escala original 1:50,000) para inferir los límites de inundabilidad, a partir de la morfología y morfometría del terreno. Para la delimitación preliminar de unidades del paisaje se utilizó un compuesto de falso color de la imagen Landsat TM, combinando la respuesta espectral de las bandas del infrarrojo cercano con la del verde (RGB 4, 5,2), con el fin de discriminar digital y visualmente el vigor de la vegetación, asociado a la humedad de los suelos (valoración cualitativa de la biomasa) y los suelos expuestos sin cubierta vegetal (Fig.8). Sobre este compuesto se realizó la primera clasificación visual, estableciendo unidades preliminares del paisaje, a partir de las claves de identificación de color, textura y forma.

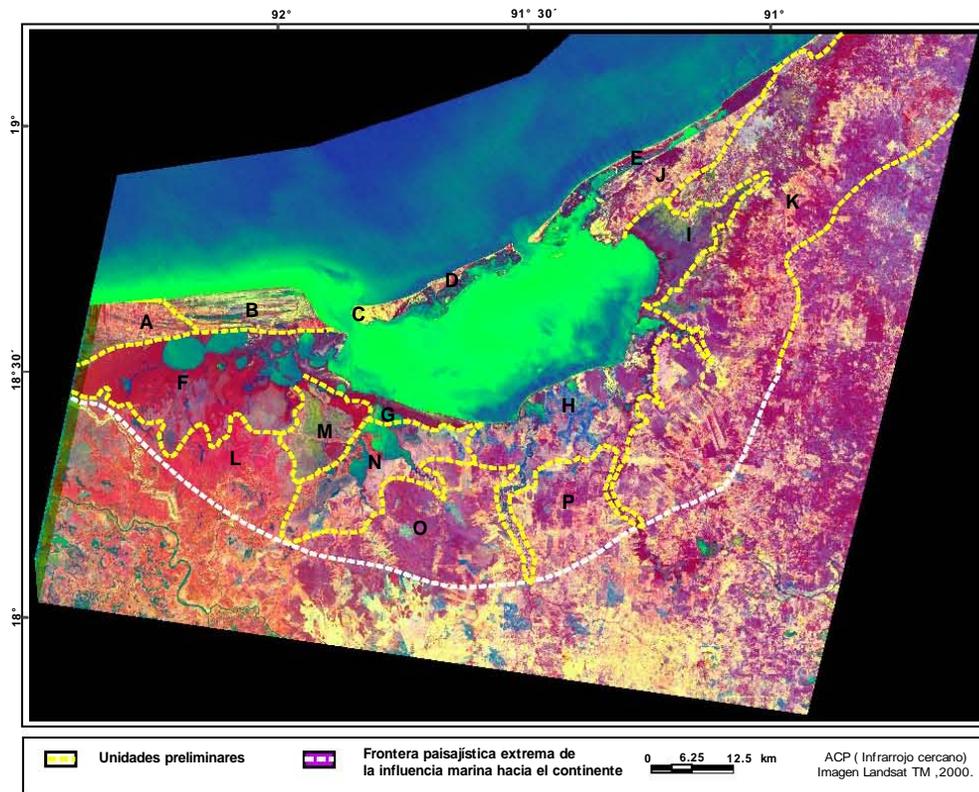


Figura 8.- Delimitación preliminar de las unidades del paisaje costero en la interfase continental de la Laguna de Términos, Camp.

#### ▪ Ajuste digital de las fronteras mediante un ACP (Análisis de Componentes Principales).

Para ajustar digitalmente las fronteras preliminares bajo criterios estadísticos de reflectancia, se clasificó digitalmente (programa ENVI-Environment for Visualizing Images-) en modo supervisado, un compuesto de falso color que resume toda la información digital estadísticamente relevante de la imagen Landsat TM. A través de un ACP, conocido como Tasseld cap, se discriminan tres planos de variación: suelos, vegetación y humedad (suelos húmedos y agua). Los dos primeros planos, discriminan el comportamiento fenológico de la vegetación en su relación con las condiciones ambientales y el tercero la humedad en el suelo. Su fundamento estadístico se basa en obtener de todas las bandas, a excepción de la termal, tres componentes. A partir de una matriz de covarianza se asocian los valores más significativos para cada componente (recuadros naranja del Cuadro 4). El brillo es una sumatoria de la reflectividad total. El verdor pondera la importancia de la banda 4 (infrarrojo cercano) por sobre los valores negativos de las bandas del visible. La humedad relaciona el contenido de humedad en la vegetación y en el suelo. Esta última está vinculada con el infrarrojo medio, donde se manifiesta con mayor claridad la absorción del agua (Chuvieco, 1990).

Cuadro 4.- Matriz de covarianza Tasseld cap.

Componente	TM1	TM2	TM3 Rojo	TM4 Infrarrojo cercano	TM5 Infrarrojo medio	TM7
Brillo	0.3037	0.2793	0.4743	0.5585	0.5082	0.1863
Verdor	-0.2848	-0.2435	-0.5436	0.7243	0.0840	-0.1800
Humedad	0.1509	0.1973	0.3279	0.3406	-0.7212	-0.4572

Modificado de Crist y Cicone, 1984

En el compuesto de falso color, combinando los tres planos del Tasseld cap (Fig. 9), se pueden diferenciar las unidades del paisaje inundables de las no inundables, y las cubiertas de vegetación de los suelos desnudos. Del mismo modo dentro de las zonas inundables se pueden distinguir diferentes niveles de saturación de humedad en el suelo.

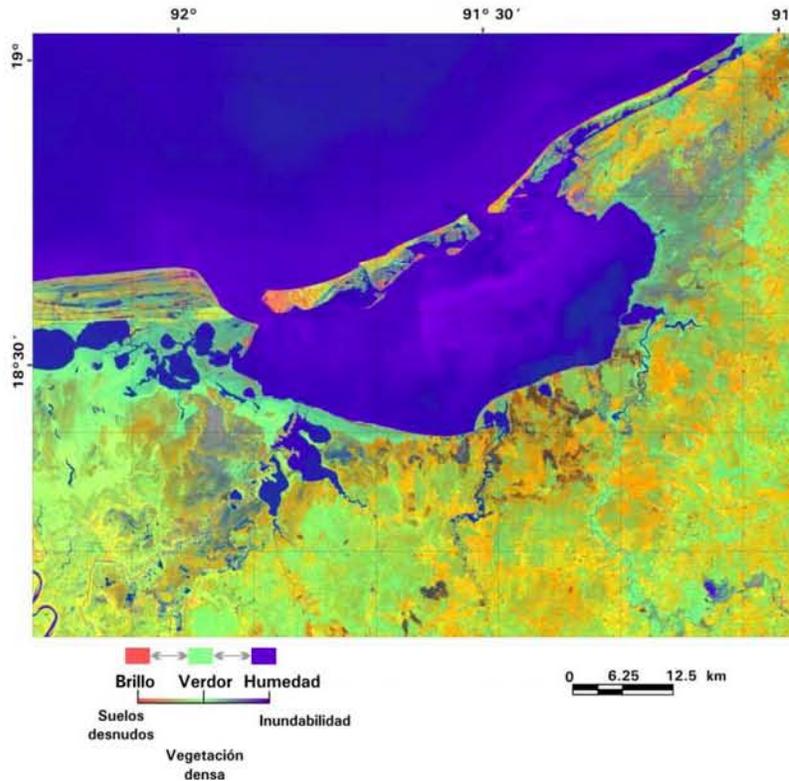


Figura 9.- Compuesto de falso color Tasseld cap en la Laguna de Términos, Camp.

Sobre el Tasseld cap se escogieron 20 campos de entrenamientos representativos para clasificar la imagen en modo supervisado, utilizando como referente la primera delimitación visual de unidades del paisaje.

### Identificación de la predisposición del relieve a la movilidad superficial del agua.

En el ambiente litoral, la humedad edáfica y su relación con el vigor y desarrollo de la vegetación están determinadas por el régimen de mareas y la intrusión salina. En un ciclo mareal de 28 días se detectan niveles de entre 0.1 y 0.9 m con alturas promedio entre 0.38 y 0.41 cm. (Kjerfve, 1988). Las mareas en su régimen regular (alturas promedio), tienen influencias directas sobre elementos del paisaje como la cubierta vegetal. Sin embargo, para el caso de las mareas vivas, los límites se infieren de forma indirecta. Para obtener esta frontera se utilizó el modelo digital del terreno (MDT) a escala 1:50,000 del INEGI (1988), interpolando en el programa Arcview3.2 curvas de nivel cada metro dentro del primer rango de alturas entre 0 y 10 msnm. Se parte del supuesto de que la curva de nivel de 1 metro (Fig. 10) limita el área de influencia máxima de mareas sobre terrenos terrestres continentales.

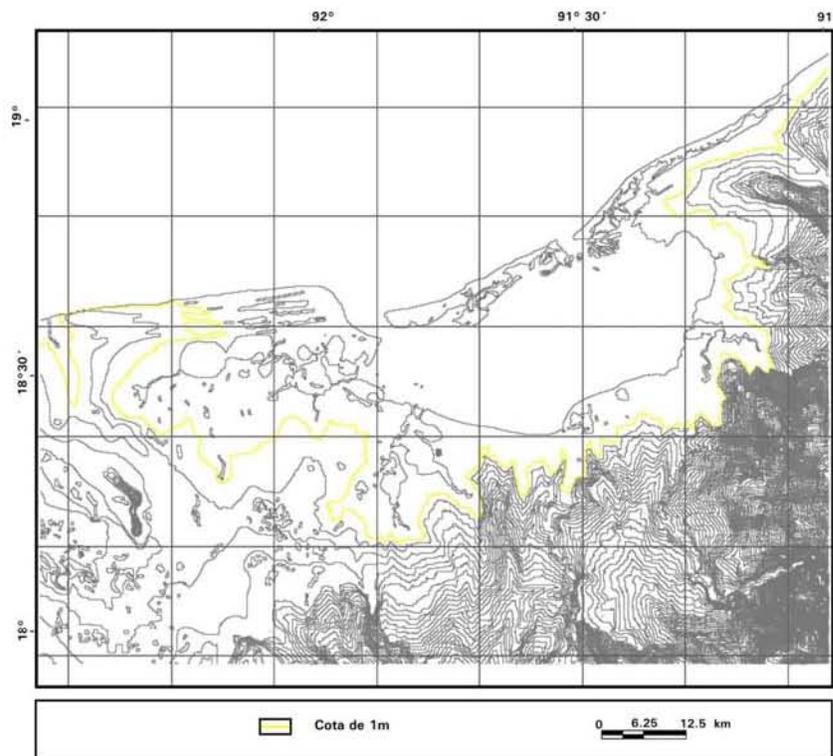


Figura 10.- Modelo topográfico del terreno en la Laguna de Términos, Camp., señalando el área de influencia máxima de marea sobre terrenos terrestres continentales.

El MDT permite, al mismo tiempo, diferenciar el sistema general de geoformas y zonas con distintos grados de predisposición a la movilidad superficial del agua. Las geoformas se agrupan según su génesis y la dinámica hidrológica que condiciona su diseño morfogenético. Para el área de estudio se detectaron dos zonas, según la facilidad o inhibición ante escurrimientos: la Este y la Oeste. La zona Oeste es notoriamente más susceptible a las

inundaciones, debido a los bajos promedios de pendiente ( $< 1^\circ$ ) en planicies intermareales y fluvio-palustres; y la zona Este, que aunque tiene también pendientes someras ( $> 1^\circ$ ) los gradientes se incrementan con mayor rapidez en la horizontal, debido a su cercanía con los lomeríos bajos del Mioceno.

b) Fase de campo.

Para verificar la validez de las fronteras paisajísticas terrestres preliminares, establecidas en gabinete, se realizaron cinco recorridos de campo. Sobre rutas almacenadas en equipos GPS (*Global Positioning System* o Geoposicionador Global) se registraron, en formatos prediseñados, los datos más significativos del paisaje para detectar fronteras paisajísticas.

Los recorridos fueron diseñados para cumplir con un muestreo aleatorio estratificado, basado en la clasificación preliminar de paisajes y según la accesibilidad a los sitios de muestreo. En este sentido, algunas rutas originales tuvieron que ser modificadas, debido a la inaccesibilidad natural del terreno por condiciones de la tenencia de la tierra, que impiden el paso a las propiedades.

El primer recorrido (Fig.11-1) se realizó alrededor y sobre los humedales costeros y dulceacuícolas de la Laguna de Términos. Se identificaron y caracterizaron las planicies palustres y fluvio-palustres, así como la vegetación hidrofítica y mesofítica asociada. Este recorrido incluyó 230 puntos de reconocimiento en ruta, documentados con información clave de los elementos del paisaje (relieve, suelo y vegetación). Se detectaron fronteras entre unidades del paisaje asociadas a gradientes de humedad, determinados por unidades hidrogeomórficas como: planicies hidromórficas con vegetación hidrófita (tular y mangle), planicies semihidromórficas (selva baja inundable) y planicies palustres emergentes (Fig.12) cubiertas por vegetación de selvas medianas y altas inundables (subperennifolias).

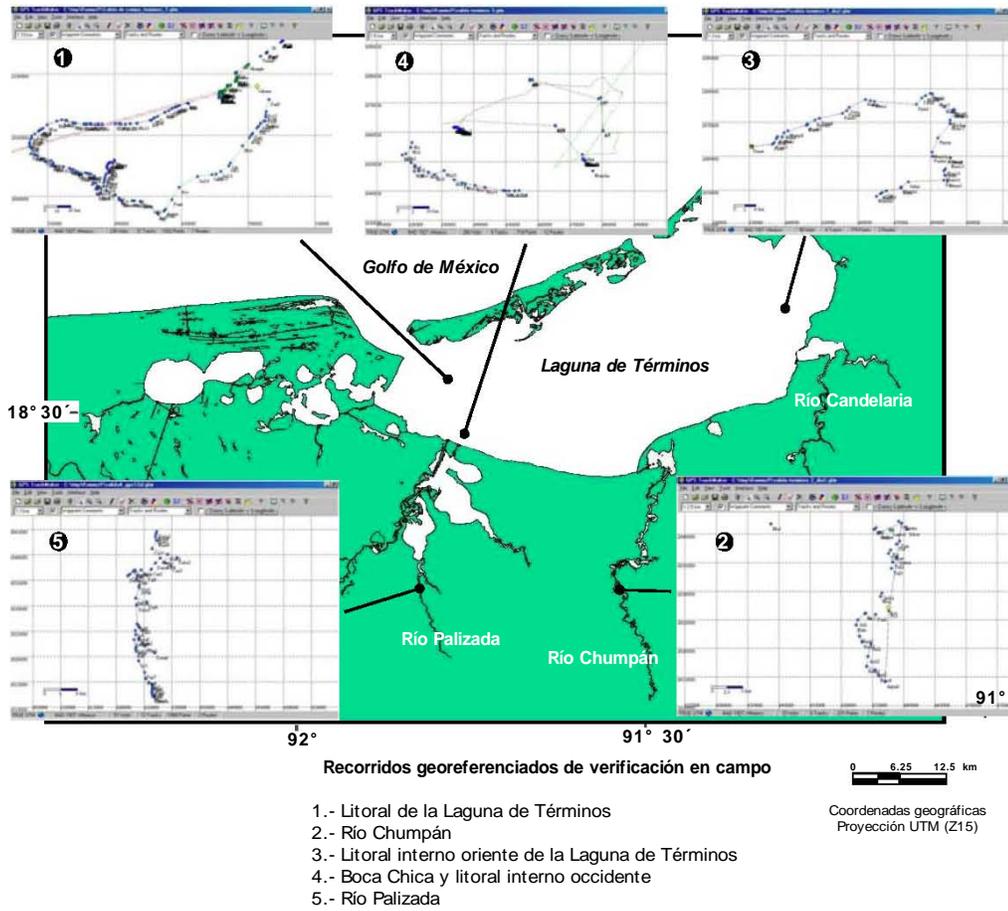


Figura 11.- Rutas de los recorridos de campo en la Laguna de Términos, Camp.



Figura 12.- Vegetación mesofítica representativa de planicies palustres emergentes en la Laguna de Términos, Camp.

El segundo recorrido se realizó durante dos días sobre ambientes acuáticos. El primer día sobre el Río Chumpán (Fig.11-2), buscando indicadores ambientales perpendiculares a la línea de costa, que mostraran cambios graduales de la influencia estuarina, a través de la medición de parámetros físico-químicos del agua y de las asociaciones vegetales riparias. Se identificaron elementos bióticos representativos de la influencia marina, en ambientes fluvio-lacustres a 23 Km en línea recta de la boca marina más cercana (Fig. 13). Igualmente se identificaron gleysoles éutricos tendientes a hísticos.



Figura 13.- Mangle rojo (*Rhizophora mangle*) perturbado y gleysoles en el Río Chumpán, Camp. como indicadores de influencia marina sobre el continente.

Durante el segundo día, se caracterizaron los ambientes lagunares recorriendo el litoral interno de Isla del Carmen, en su parte oriental (Fig. 11-3), ubicando pastos marinos y diferenciando dos tipos de emplazamientos o sustratos para manglares. Detrás de una importante franja de manglar negro (Fig. 14) con diferentes estratos sobre sustratos arenoso-limosos, se encuentra manglar estructuralmente más bajo tipo matorral asociado a sustratos rocosos. Esta salida incluyó 83 puntos de reconocimiento en ruta, en los cuales se colectaron datos sobre el tipo de fondo, la profundidad y los parámetros físicoquímicos del agua.



Figura 14.- Manglar negro (*Avicennia germinans*) el borde litoral acumulativo, en el oriente de la Laguna de Términos, Camp.

En el tercer recorrido (Fig. 11-4) se incluyeron 266 puntos de reconocimiento en ruta, verificando la estructura y composición florística de la vegetación acuática y subacuática en las unidades asociadas al ambiente lagunar, como mangle rojo (*Rhizophora mangle*) y mangle negro (*Avicennia germinans*) en Boca Chica y Palizada, y pastos marinos (*Thalassia testidium*) en el área de influencia insular interior (Fig.15) de Isla del Carmen.



Figura 15.- Pastos marinos (*Thalassia testidium*) en el litoral interno de Isla del Carmen, Camp.

Durante el cuarto recorrido, se identificaron ecotonos en ambientes fluvio-palustres y estuarinos a lo largo de transectos perpendiculares al Río Palizada (Fig.11-5), utilizando parámetros físico-químicos en agua como

salinidad y transparencia, e indicadores morfológicos y vegetales. Se detectó el sector acuático superior de la influencia estuarina promedio con 0.1 ups de salinidad para la época seca y el lugar donde inician los ambientes propiamente fluviales. El desarrollo de la morfología fluvial en el área de estudio se encuentra en facies de lecho, sin embargo, en algunas secciones se pueden observar morfologías más evolucionadas de terrazas fluviales incipientes, holocénicas jóvenes (Fig. 16).



Figura 16.- Primera secuencia de terrazas fluviales holocénicas jóvenes y fluvisoles en las planicies fluvio-palustres adyacentes en el río Palizada, Camp.

### c) Fase final.

Después del trabajo de campo, se corroboran o modifican las fronteras paisajísticas preestablecidas para la interfase continental. Según el modelo conceptual, se sobreponen y ponderan (importancia relativa) en un modelo cartográfico preliminar, las capas de información concernientes a : la visión sinóptica preliminar de los componentes visibles de los humedales en su expresión espacial, incluyendo el vigor de la vegetación y los suelos expuestos inundados o secos; el ajuste digital de las fronteras paisajísticas bajo criterios estadísticos de reflectancia (brillo, verdor, humedad); la predisposición dinámica del relieve a la movilidad superficial del agua según la morfología, morfometría y tipo de materiales geológicos y edáficos, y las rutas de verificación en campo, que aportan información puntual extrapolable espacialmente por analogías geográficas.

A partir del modelo conceptual y el modelo cartográfico preliminar, se diseña la primera tipología de unidades del paisaje para la interfase continental, utilizando la cartografía preliminar generada en este trabajo, la cartografía regional de paisajes geomorfológicos (Bautista *et al.*, 2005), la cartografía edafológica (INEGI, 1980a), la cartografía geológica (INEGI, 1980b) y de uso del suelo (SEMARNAP, 2000).

La propuesta cartográfica final de unidades del paisaje costero, que se detalla posteriormente, fue el resultado de la sobreposición y ponderación de capas de información espacial, antes explicadas en el SIG (Sistema

de Información Geográfica) Arcview 8.0. Mediante un análisis condicional y álgebra de mapas en formato raster, se obtuvo un mapa síntesis, agrupando características coincidentes, que finalmente se transformaron a formato vectorial. La importancia relativa de cada capa está determinada por indicadores clave de inundabilidad para humedales costeros tropicales. De manera, que regímenes de inundabilidad similar, en ambientes hidrogeomórficos similares y con respuestas de vegetación homogéneas, son las características clave para establecer la tipología de unidades del paisaje a escalas medias.

### II.1.2.2.- Interfase marina.

La detección de bordes o fronteras para la interfase marina se basa en muestreos mensuales de parámetros físico-químicos y biológicos del agua durante un año, en 22 estaciones distribuidas sobre el vaso lagunar y las bocas en el área de estudio. Para definir espacialmente y con mayor precisión los límites estadísticos puntuales obtenidos de los muestreos por estación, se utilizaron algunos elementos visibles del paisaje en imágenes de satélite de alta resolución, como la relación turbidez-transparencia, la morfología subacuática asociada a fondos someros y la morfología litoral. Igualmente, para detectar superficies continuas discretas que muestren la variación espacial de datos puntuales, se utilizaron métodos de interpolación tradicionales y optimizados por métodos geoestadísticos (kriging). Estos métodos son herramientas útiles para inferir fronteras en espacios acuáticos, donde la visual es monótona y sin cambios visibles.

#### a) Fase preliminar.

Para esta fase se toman como antecedente dos caracterizaciones de subsistemas (equivalente de geosistemas), acuáticos propuestos por Yáñez-Arancibia *et al.* (1988) y Ramos (2000). Ambos autores plantean la existencia de 5 subsistemas, aunque con diferentes fronteras. Igualmente utilizan parámetros físico-químicos y biológicos del agua y análisis estadísticos multivariados para determinar su importancia relativa. Debido a que los subsistemas de Yáñez-Arancibia *et al.* (1988) coinciden, en la mayoría de sus fronteras, con los subsistemas de Ramos (2000), que además incluye procedimientos estadísticos actualizados, se decidió tomarla como antecedente para completar la serie temporal de datos hidrológicos.

Para incluir el enfoque espacio-temporal en la delimitación de subsistemas, se incorporaron criterios de análisis complementarios, que incluyen la dinámica morfogenética y morfodinámica, la presencia o ausencia relativa de vegetación subacuática y acuática y la hidrodinámica asociada a las geoformas y fondos. Se buscan los

indicadores visibles y los no visibles, pero identificables a partir de medidas indirectas. Los principales criterios complementarios para la delimitación preliminar de unidades del paisaje en la interfase marina (Fig.17) son:

- Geodinámica costera.- efecto de la insularidad de Isla del Carmen sobre la morfogénesis hacia el litoral interno de la laguna y mar adyacente.
- Morfogénesis subacuática asociada a los deltas interiores, estuarios y esteros.
- Hidrodinámica.- sistema de corrientes –circulación preferente, dirección, efecto de mareas, canales de reflujo-
  - Limnología.
  - Dinámica estuarina.
  - Turbidez de origen fluvial y/o marina.
- Análisis estadístico multivariado entre sitios de muestreo y parámetros físico-químicos y biológicos del agua (salinidad, temperatura, oxígeno disuelto, pH, transparencia, nutrientes, clorofila), en superficie y fondo.
- Análisis espacial de patrones de homogeneidad relativa en parámetros físico-químicos del agua (polígonos de Thiessen, interpolación lineal)
- Ambientes sedimentarios (origen, tipo, distribución y contenido de carbonatos de calcio, silicatos y materia orgánica).
- Distribución de variables bióticas (vegetación acuática y subacuática, y diversidad de organismos bentónicos).

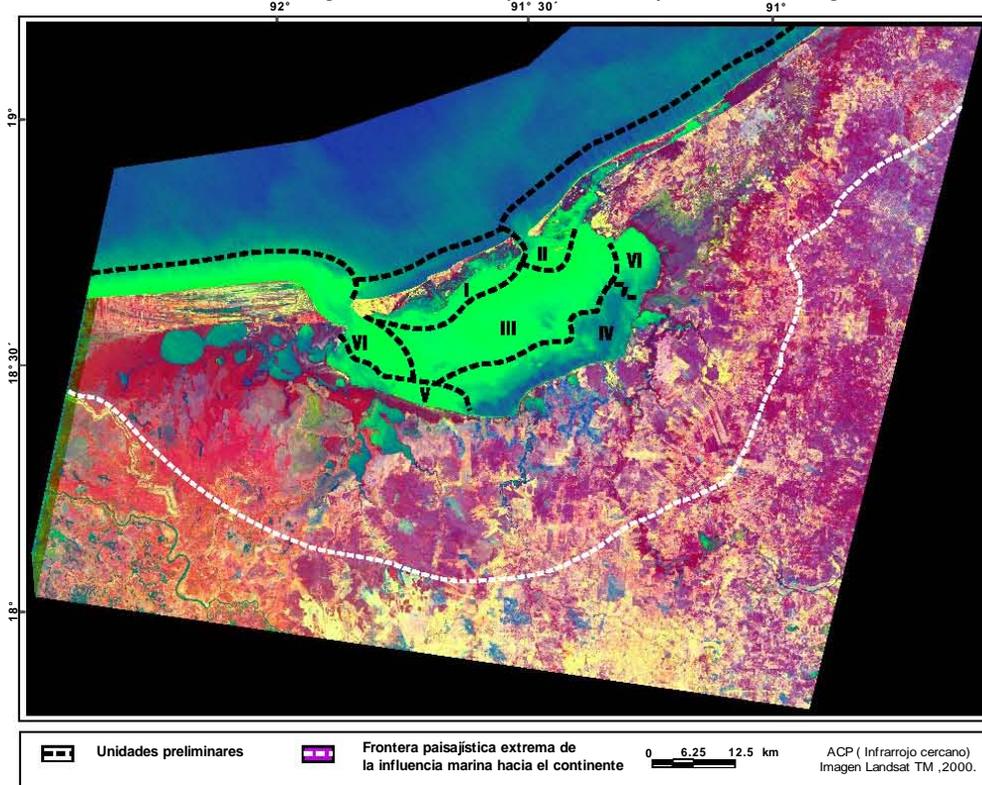


Figura 17.- Delimitación preliminar de las unidades del paisaje costero en la interfase marina de la Laguna de Términos, Camp.

La delimitación de unidades preliminares para la interfase marina, se basa en los análisis complementarios expuestos anteriormente y con los datos disponibles. Su trazo delimita áreas de homogeneidad relativa e integridad funcional, que se vinculan, al mismo tiempo, con las unidades de la interfase continental.

b) Fase de campo.

Para comparar los datos disponibles de la red de estaciones de muestreo utilizada por Yáñez-Arancibia *et al.* (1988) y Ramos (2000) con los datos obtenidos durante los nuevos muestreos, se tomaron como referencia los mismos sitios, sólo que en diferente orden (Fig. 22). Se realizaron muestreos mensuales de dos días durante un año, midiendo parámetros físico-químicos y biológicos del agua con el multianalizador portátil de agua Hydrolab H20. El muestreo sigue la red de estaciones predefinidas, preferentemente sobre las zonas marginales, donde existen mayores contrastes ambientales espacio-temporales, e incluye profundidad, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, redox, clorofila, nutrientes y materia particulada.

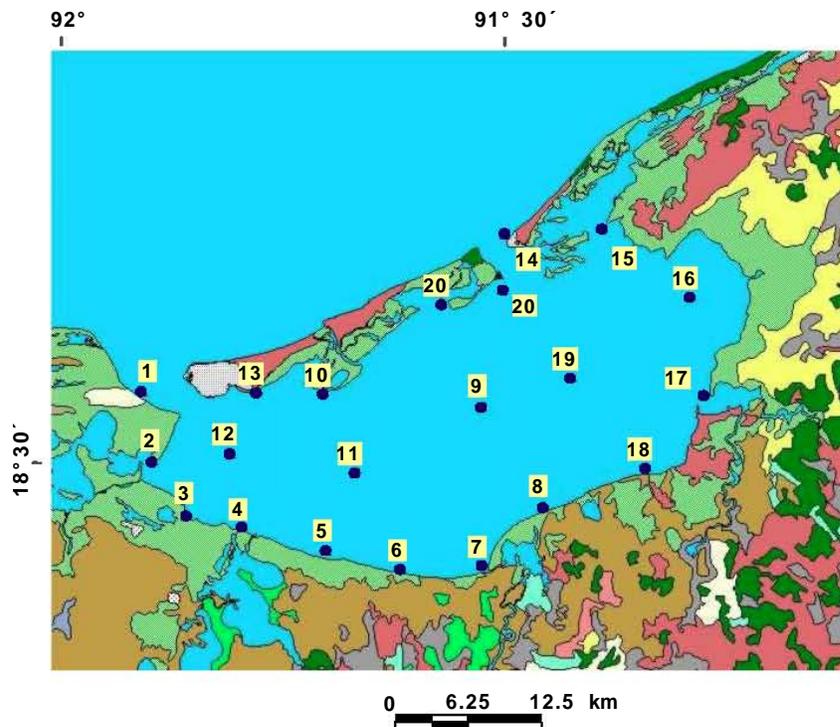


Figura 22.- Distribución de las estaciones de muestreo en la Laguna de Términos, Camp.

Se utilizaron los mismos recorridos de campo que para la interfase continental, variando solamente los procedimientos de medición y colecta de datos físico-químicos y biológicos del agua.

c) Fase final.

Para la interfase marina, además de la identificación de los rasgos emergentes o visibles del paisaje, es necesario auxiliarse con métodos estadísticos multifactoriales y geoestadísticos complementarios, basados en los datos obtenidos durante el trabajo de campo. Al igual que en la interfase continental el resultado del modelaje se cartografió a escala 1:250,000.

**\*Determinación de la relevancia de los elementos del paisaje en la conformación de unidades en la interfase marina.**

Para establecer la relevancia estadística de los elementos y variables del paisaje costero en la interfase marina, se aplicaron dos técnicas de tipo exploratorio sobre los datos físico-químicos del ambiente acuático: un ACP (análisis de componentes principales) y un análisis de conglomerados o cluster. EL ACP es una técnica estadística de síntesis de la información, o reducción de la dimensión (número de variables). Es decir, ante un banco de datos con muchas variables, el objetivo es reducirlas a un menor número perdiendo la menor cantidad de información posible. Los nuevos componentes principales o factores son una combinación lineal de las variables originales y permite interpretar la información con mayor facilidad. Un aspecto clave en ACP es la interpretación de los factores, ya que ésta no viene dada a priori, sino que será deducida tras observar la relación de los factores con las variables iniciales. Para homogeneizar las varianzas y los pesos relativos de los parámetros se aplicó el  $\log_{10}$  (Dillon y Goldstein, 1984).

Por otra parte, el análisis de conglomerados permite agrupar variables, de tal forma, que los datos sean homogéneos dentro de los grupos (mínima varianza) y que éstos sean lo más heterogéneos posible entre ellos (máxima varianza). Este análisis se aplica una vez identificados los parámetros más representativos estadísticamente, lo que permitió formar posteriormente, conglomerados o grupos de estaciones de muestreo afines.

El primer ACP incluyó características sedimentológicas del sustrato. Sin embargo, la presencia de dos grandes grupos de sedimentos (terrígenos y carbonatados) con altos porcentajes de abundancia, sesgó el estudio hacia la mayor significancia porcentual por sobre el resto de las variables y su importancia estadística. Por lo anterior, se decidió considerar variables de la misma naturaleza bajo condiciones ecológica similares, para reducir el riesgo de valorar equivocadamente su significado estadístico y las relaciones entre los sitios de muestreo.

Una vez compilados los datos de todo el año se analizaron sus pesos y correlaciones mediante un ACP. Los dos primeros componentes explicaron el 43% de la varianza total y permitiendo identificar las variables con mayor

peso relativo. Como se observa en el cuadro 5, la salinidad, y por tanto, la conductividad son las variables más representativas del análisis para el primer componente, incluyendo la correlación inversamente proporcional con los nitritos ( $\text{NO}_3$ ). En el segundo componente, las variables más significativas fueron el oxígeno y la temperatura superficial. Aunque los dos primeros componentes sintetizan la importancia estadística de mayor relevancia para los parámetros considerados, en los dos componentes restantes destacan el pH, la materia particulada, los nutrientes y la clorofila, en orden decreciente.

Cuadro 5.- Análisis de componentes principales de las variables físico-químicas del agua en la Laguna de Términos, Camp.

	Componente 1	Componente 2	Componente 3	Componente 4
Temperatura superficie	0.33466997	<b>-0.75143771</b>	0.20199541	0.13526358
Salinidad superficie	<b>0.92037942</b>	-0.09034907	0.09062567	0.08997301
O <sub>2</sub> superficie	-0.02312654	<b>0.77556404</b>	0.20064099	-0.41027683
pH superficie	0.33318754	-0.25986858	<b>0.81254866</b>	-0.04598108
Conductividad superficie	<b>0.90880182</b>	-0.06384869	0.12299229	0.13488325
Redox superficie	-0.06583296	0.7853594	-0.26783315	0.16173634
Clorofila	-0.19311801	0.07818491	0.03580792	0.04922079
NO <sub>2</sub>	0.27483205	-0.11542871	<b>-0.63583765</b>	0.166518
NO <sub>3</sub>	<b>-0.70979278</b>	0.05422277	0.12703119	0.3024298
NH <sub>4</sub>	-0.18080034	0.01609187	-0.07036904	<b>0.56525518</b>
PO <sub>4</sub>	-0.24126731	0.15332955	-0.10810142	<b>-0.59805492</b>
SiO <sub>4</sub>	-0.41511808	0.12646301	0.06877239	<b>-0.66880617</b>
Materia particulada	0.00633931	<b>-0.53878668</b>	<b>-0.56625842</b>	-0.14931599
Expl.Var	2.91086022	2.46740362	1.66058625	1.76523702
Prp.Totl	0.20791859	0.17624312	0.1186133	0.12608836

#### ▪ Análisis de conglomerados y su relación con las variables físico-químicas y su significado espacial.

Para encontrar las diferencias y similitudes entre las 22 estaciones, según los parámetros físico-químicos y biológicos considerados, se realizó un análisis de conglomerados. Esta técnica estadística utiliza las diferencias o distancias geométricas entre las variables para encontrar patrones de asociación entre los elementos del análisis. Primero, a partir de una matriz de datos físico-químicos y biológicos del agua, se obtuvieron las distancias euclidianas aplicando la medida de distancia City-block (Manhattan), que promedia distancias simples en varias dimensiones. Para determinar qué grupos se unen o dividen, se utiliza una función objetivo o criterio que, en el caso de los métodos aglomerativos, recibe el nombre de enlace. En este estudio se utilizó el enlace completo o vecino más alejado, que mide la proximidad entre dos grupos, calculando la distancia entre sus objetos más lejanos o la similitud entre sus objetos menos semejantes.

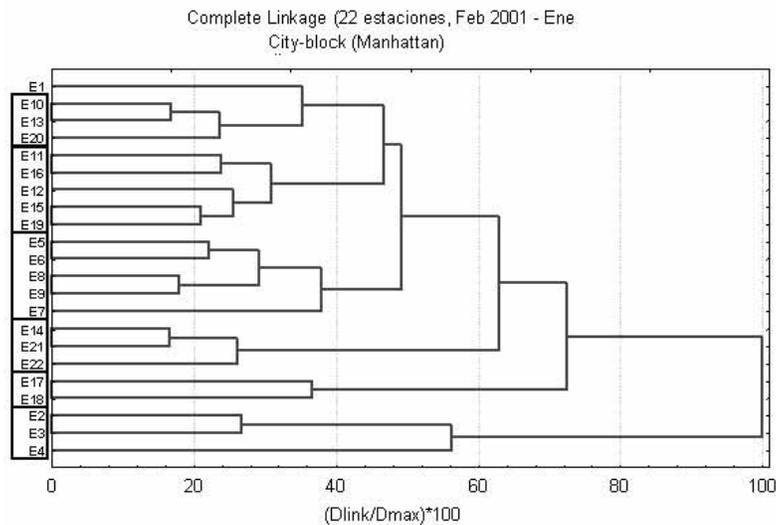


Figura 18.- Análisis de conglomerados para establecer afinidades ambientales entre estaciones de muestreo del cuerpo de agua en la Laguna de Términos, Camp.

Como se puede observar en la figura 18, el análisis de conglomerados permitió formar 6 unidades que recién ahora se empezaron a llamar geosistemas. El geosistema 1 integrado por las estaciones 10,13 y 20, el geosistema 2 por las estaciones 11,16,12,15,19; el geosistema 3 por las estaciones 5,6,8,9 y 7; el geosistema 4 por las estaciones 14,21,22; el geosistema 5 por las estaciones 17,18; y el geosistema 6 por las estaciones 2,3,4. Todos tienen correspondencias cercanas con los subsistemas preliminares con variantes, que tuvieron que ver con la incorporación de variables antes no consideradas.

#### ▪ Modelaje para la creación de superficies continuas a través variables puntuales.

Una vez conocida la relevancia estadística de las variables físico-químicas y las afinidades entre las estaciones de muestreo, se realizaron interpolaciones para inferir ámbitos de dominio espacial con umbrales promedio entre datos puntuales. Éstos permiten predecir el valor de los atributos de sitios no muestreados, a partir de medidas a nivel puntual dentro de la misma área o región (Burroug y McDonnell, 1998), basadas en estadística simple u optimizada con criterios geoestadísticos.

Para la delimitación de fronteras entre los grupos de estaciones con similitudes estadísticas, se recurrió a los polígonos de Thiessen o Voronoi, que delimitan áreas de influencia, a través de datos promedio dentro de una ventana o distancia medida. Si los puntos de muestreo son equidistantes se forman cuadrados regulares, sino es así, se realiza la triangulación de Delaunay, que origina finalmente polígonos de Thiessen (Fig.19), a partir de un capa de información en formato raster, para la red de muestreo del vaso lagunar.

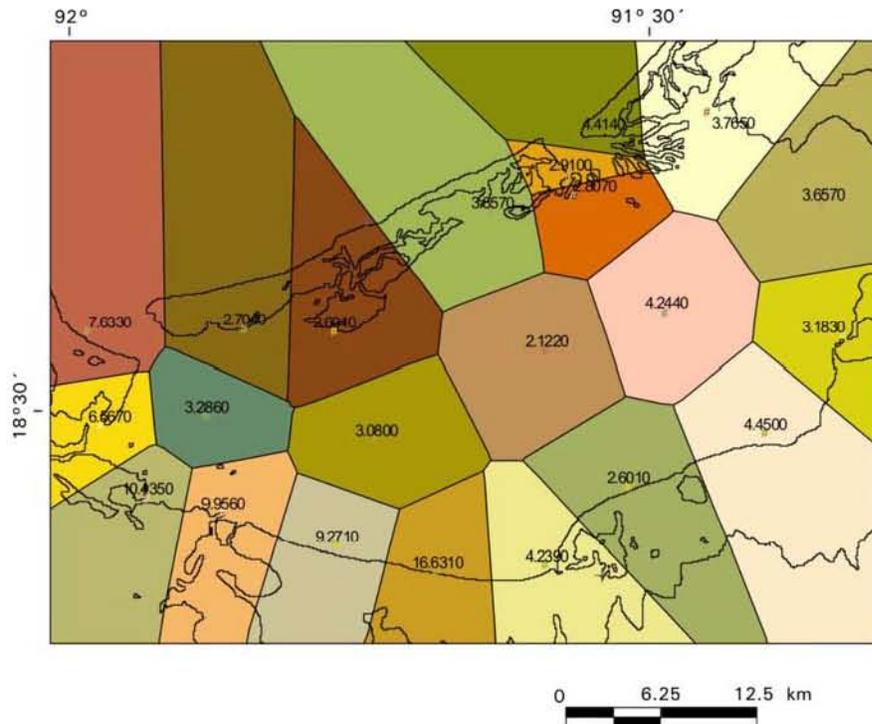


Figura 19.- Polígonos de Thiessen trazados según la red de estaciones de muestreo acuático en la Laguna de Términos, Camp.

La homogeneidad relativa que suponen los polígonos de Thiessen permite utilizar el análisis de conglomerados para unir ámbitos de influencia de mínima varianza entre las áreas circundantes a las estaciones de muestreo. Refleja, por tanto, ámbitos de homogeneidad espacial, independientemente de los valores de los parámetros considerados.

Una vez conocida la relevancia estadística de la salinidad sobre los otros parámetros, se utilizaron los muestreos puntuales para realizar un grid interpolado sobre el cuerpo de agua de la Laguna de Términos. Esto con el fin de encontrar patrones espaciales, que expliquen la variabilidad de las fronteras paisajísticas.

Los datos de salinidad disponibles a nivel puntual por estaciones, se extrapolan a los espacios sin datos, mediante el método geoestadístico de interpolación lineal denominado kriging ordinario (Fig. 20). Este asume que la variación en los valores está libre de cualquier tendencia de variación (*drift*), e infiere, en función de los pesos relativos de los datos puntuales, una longitud promedio de escala, a partir de la cual se evita tener picos de variación en la distribución de los nuevos valores de interpolación. Por otra parte, incluye por defecto el concepto de anisotropía, que explica la distribución natural o tendencia de los fenómenos en su distribución espacial.

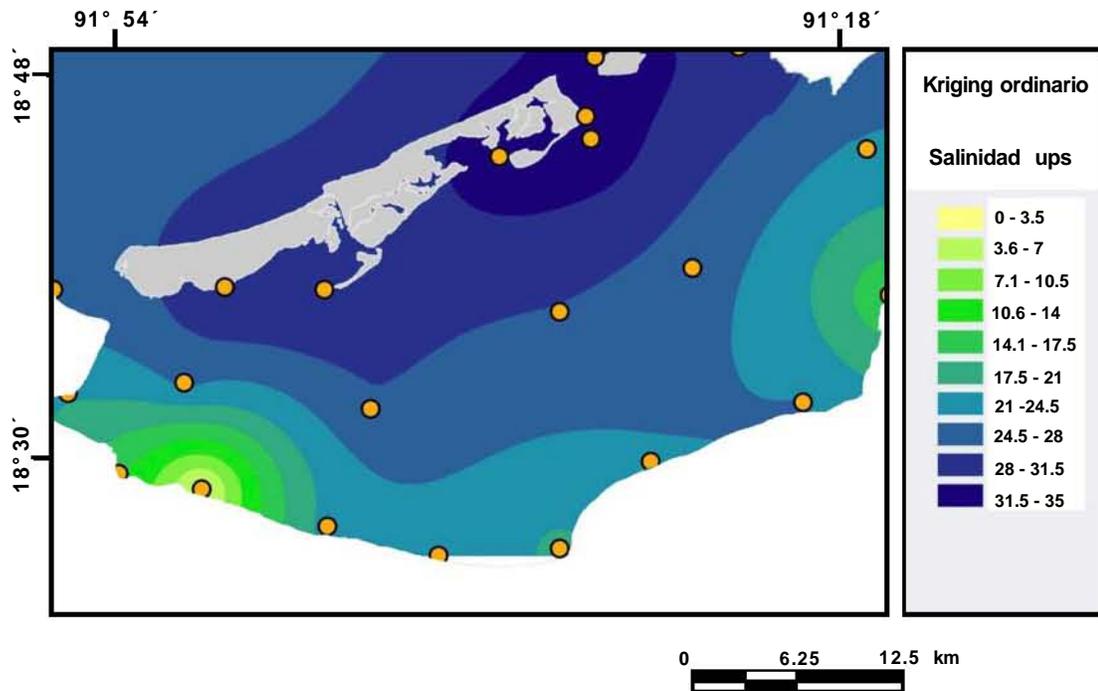


Figura 20.- Distribución de la salinidad promedio en la Laguna de Términos, Camp., en la época seca del año.

Como se observa en la figura 20, existe un patrón de distribución de salinidad para la época seca, asociado a los aportes de agua dulce y las entradas de agua marina hacia la Laguna de Términos. Cabe aclarar, que aunque éste varía dependiendo de la época del año (secas, lluvias o nortes), existen en general comportamientos repetibles caracterizados por volúmenes y direcciones de flujos, tanto continentales como marinos. Las salinidades extremas oscilan entre las 0.85 ups, en nortes, y las 37 ups, en secas.

Los rangos de salinidad son parámetros primordiales en la ecología costera y en la delimitación de unidades del paisaje. Los rangos utilizados fueron: < 0.5 ups agua dulce, 0.5 -5.0 ups oligohalino, 5.1 -18.0 ups mesohalino, 18.1 -30.0 ups polihalino, 30.1 -40 ups eurihalino.

#### ▪Detección de turbidez como indicador físico discreto de las fronteras en la interfase marina.

La turbidez es un concepto asociado a la pérdida de transparencia del agua. Puede ser causada por un amplio rango de factores naturales y antrópicos, incluyendo, sedimentos suspendidos, actividad biológica y contaminación. A medida que el agua es más turbia la reflectancia en imágenes de satélite aumenta (Fig. 21). De manera que la variabilidad espacial de la turbidez puede ser mapeada usando los valores radiación reflejada y los correspondientes datos de materia particulada obtenidos en campo. Para la clasificación de la imagen se utiliza el

rango espectral del azul en el visible (banda 1) de la imagen Landsat TM5 de marzo de 2001. Baban (1993) calculó para un ambiente estuarino el siguiente cociente:

$$\text{Sólidos suspendidos} = (\text{mg/l} - 427 + 7.01 \cdot \text{TM1(ND)})$$

TM1 = banda del azul en el espectro electromagnético para una imagen Landsat TM

ND = nivel digital por píxel

Este cociente permite discriminar la turbidez de la transparencia, estableciendo correlaciones entre reflectancia y muestreos en campo. El cociente fue aplicado y adecuado para ambientes acuáticos lacustres y litorales según las medidas correspondientes en campo para la materia particulada.

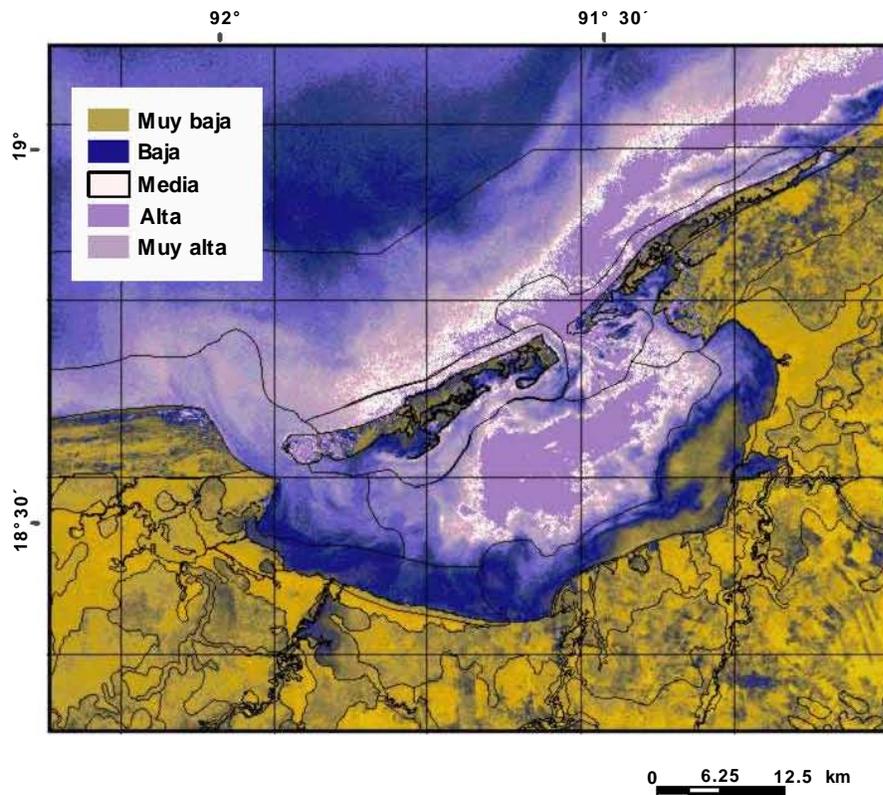


Figura 21.- Distribución de la turbidez en la Laguna de Términos, Camp., según su reflectancia.

Para un ambiente tan dinámico como la Laguna de Términos, en la práctica es difícil discriminar la turbidez orgánica de la inorgánica, debido a la mezcla de sedimentos carbonatados, terrígenos y aportes orgánicos de la vegetación de humedales costeros tropicales (manglares). Sin embargo, la inorgánica es posible detectarla, con cierta precisión, con el cociente antes mencionado. Se observaron los siguientes valores de correlación entre los colores y la materia particulada: terracota 0.030 mg/l, azul oscuro 0.037mg/l, blanco 0.043mg/l, azul medio 0.045mg/l y azul claro 0.05mg/l (Fig.21). Para describir el resultado de la clasificación no supervisada de la imagen,

se establecieron 5 rangos representativos de turbidez: desde muy baja, baja, media, alta y muy alta.

## **II.2.- Estructura espacial y tipología de unidades del paisaje en Laguna de Términos, Campeche.**

Para lograr un orden sistemático de las unidades del paisaje, obtenidas a partir de los modelos conceptuales y el seguimiento de sus etapas por interfase, se establece un sistema de clasificación tipológica. Las tipologías pueden realizarse principalmente desde dos enfoques diferentes, las destinadas a caracterizar y entender los patrones espaciales de funcionamiento de los ecosistemas y las orientadas a detectar cómo y en qué grado los paisajes originales han sido modificados por la intervención humana. En general se busca que, dependiendo del enfoque, las tipologías sean sencillas, aplicables a diferentes niveles de generalización, jerárquicas y repetibles en ambientes similares. Un factor adicional a considerar es el nivel de detalle o levantamiento. De esta forma, siempre es conveniente iniciar con los niveles deductivos de escalas medias y de reconocimiento (escala 1:75,000-1:250,000) para después profundizar en el conocimiento a nivel semi-detallado (1:75,000-1: 25,000) y detallado. Para la planeación regional los niveles de reconocimiento permiten orientar futuros estudios hacia zonas y problemáticas más específicas.

Para este trabajo la tipología tiene la función de identificar unidades del paisaje con homogeneidad estructural y funcional, de tal forma, que dentro del ámbito territorial de cada unidad, se puedan esperar respuestas ambientales análogas ante perturbaciones naturales o antrópicas similares. Bajo este supuesto, los monitoreos ambientales deberán tener también una validez extrapolable de los niveles puntuales a los generales dentro del área de relativa homogeneidad. Cabe aclarar, que algunas perturbaciones antropogénicas pueden ser tan importantes y/o localizadas que alcancen respuestas inesperadas o anárquicas.

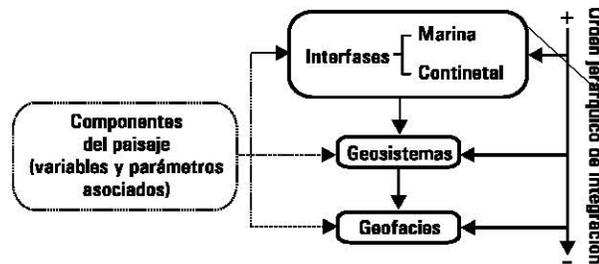
Tradicionalmente autores como Bertrand (1968), Christian y Stewart (1964), Neef (1983), Vinogradov (1998), Sochava (1978) y Zonneveld (1995), entre otros, han hecho clasificaciones abstractas de tipo corológico, diferentes en cuanto a terminología pero bajo la misma concepción territorial. En el cuadro 6, se muestran las tipologías de uso más común, según su nivel de generalización y orden jerárquico. Para este estudio se toma la terminología y los criterios de delimitación de Bertrand (1968), adaptándolos a las particularidades ambientales de la zona costera.

Cuadro 6.- Tipologías jerárquicas del paisaje.

Nivel de Generalización	Autores					
	NEEF (1983)	VINOGRADOV (1998)	SOCHAVA (1978)	BERTRAND (1968)	CHRISTIAN Y STEWART (1964)	ZONNEVELD (1995)
5°						
4°	Megachore	Landscape	Macrogechore	Zona Dominio Región natural	Main landscape	Main landscape
3°	Macrochore				Land system	
2°	Mesochore	Land system	Mesogeochore	Geosistema	Land unit	Land sytem
1°	Microchore	Land unit	Microgeochore	Geofacias	Land facet	Land facet
	Ecotope	Facies	Geochore elemental	Geotopo	Site	Ecotopo

Modificado de Etter, 1991

Los criterios de generalización espacial a nivel de reconocimiento (escala 1:250,000) se organizan a partir de los ámbitos funcionales de las interfases continental y marina (Fig. 22), siguiendo un orden jerárquico, a partir de geosistemas y geofacias.



Parcialmente basado en Bertrand, 1968

Figura 22.- Esquema de la organización jerárquica de las unidades del paisaje costero.

El geosistema es la unidad del paisaje típica de los levantamientos a nivel de reconocimiento y puede cubrir desde decenas hasta cientos de m<sup>2</sup>. Sus fronteras se circunscriben, según los ámbitos funcionales dominantes, y su reflejo a través de la cobertura territorial de sus componentes abióticos –las aguas y el relieve –, que tienden a ser más estables en su dinámica promedio, y sus componentes bióticos –la vegetación, la fauna y los antropismos–, más dinámicos e inestables (Drdos, 1992).Igualmente, el suelo como componente de transición entre lo abiótico y lo biótico, sintetiza las respuestas funcionales en la interfase continental. Todos los componentes reflejan, fisonómicamente, la dinámica de los flujos corológicos, sus formas de adaptación a éstos y la estructura o configuración de las unidades del paisaje y sus bordes. Incluyen conjuntos de geofomas con la misma génesis, patrones hidrodinámicos dominantes y tipos de vegetación. Debido a la naturaleza de los ambientes costeros bajos, en donde se ubican los geosistemas costeros del área de estudio, su estructura o conformación territorial se

encuentra estrechamente vinculada a la morfogénesis del relieve (por su estabilidad en el tiempo) y a la hidrodinámica tanto continental como marina.

En orden jerárquico inferior, se incluyen las geofacies como unidades elementales del paisaje sobre las que se asienta, de acuerdo con Bertrand (*op cit.*), el nivel operativo del análisis detallado del territorio. El emplazamiento de las geofacies, responde a subprocesos asociados a un comportamiento funcional dominante de mayor cobertura territorial, que presentan una geodinámica temporal de carácter cíclico o extraordinario. Debido a la variabilidad funcional intrínseca diaria y estacional del paisaje costero, dentro de un mismo ámbito territorial, se pueden presentar cambios fisonómicos notorios como resultado, sobre todo, de la movilidad vertical y horizontal de los prismas de agua costera. En la interfase marina, los ritmos y patrones de movilidad del agua y su caracterización físico-química, permiten inferir, indirectamente, los ámbitos funcionales en su expresión espacial promedio, para un periodo de tiempo específico. Las variantes de estos procesos, permiten delimitar áreas de influencia relativa, según el origen (marino o continental) e importancia de los flujos corológicos. Los componentes abióticos cubiertos por o dentro del agua (sedimentos), se caracterizan según la morfología submarina o emergente y la sedimentología, y contribuyen a definir la extensión territorial de las geofacies en ambientes acuáticos y anfibios, de manera que se presentan geoformas sumergidas y emergentes de apertura bidireccional continente-mar, ambientes acuáticos de movilidad acuática restringida (bocas y barras), de cuerpos de agua semicautivos y de mar abierto. Igualmente, los componentes bióticos acuáticos y subacuáticos (vegetales y animales bentónicos), reflejan las condiciones funcionales promedio de la estructura topológica en las geofacies de la interfase marina.

El sistema de unidades del paisaje en Laguna de Términos está compuesto por dos interfases, 13 geosistemas (5 marinos y 8 continentales) y 12 geofacies (Cuadro 7). La interfase marina comprende los geosistemas del vaso lagunar y zona marina adyacente, y la interfase continental los geosistemas terrestres regulados por los regímenes de inundación sobre planicies de distintos orígenes. Los nombres asignados a los geosistemas y geofacies describen características funcionales significativas, sin embargo, siguen los principios de orden paisajístico, basados en el arreglo estructural y genético (Fig. 23).

#### **a).-Interfase marina.**

*1.- Geosistema de efecto insular.-* planicie epinerítica subacuática subhorizontal, de fondos arenosos calcáreos y conchas enteras o fragmentadas de moluscos. Ambiente sedimentario de transición entre la zona litoral y la plataforma continental inmediata. Forma parte de la morfología subacuática costero-marina que condiciona, ambientalmente, ecotonos marinos y lagunares. Su expresión insular marina se origina a partir de pendientes de

playa sumergidas, asociadas a la morfología sedimentaria de bermas dentro del subambiente interlitoral. Recibe influencia directa del oleaje con rompientes entre 30 y 70 cm. Por otra parte, la expresión insular lagunar hacia sotavento, es resultado de la acreción marina de abanicos de deslave que unieron antiguos cúmulos de arena y presenta menor energía hidrodinámica y baja turbidez. Aunque en el fondo predominan los depósitos de arenas calcáreas, gradualmente, y debido a poca velocidad de las corrientes en el área insular protegida (6-10 cm/s), se acumulan sedimentos limo-arcillosos. Sobre estos sedimentos, los pastos marinos, principalmente de la especie *Thalassia testidium*, desarrollan su sistema de raíces y rizomas, que al mismo tiempo, funcionan como trampa de sedimentos que estabiliza el sustrato.

Cuadro 7.- Tipología del paisaje costero en la Laguna de Términos, Camp.

<b>PAISAJE COSTERO</b>		
<b>Interfase marina</b>		
<b>Geosistemas</b>	<b>Geofacies</b>	<b>Clave</b>
I.- Efecto insular		(Ins)
II.- Bajos intermareales dispuestos en un delta interior		(Del)
III.- Estero		(Est)
IV.- Limnológico	1.- Central	(Limcen)
	2.- Marino	(Lim m)
	3.- Estuarino	(Lim est)
V.- Delta de reflujo		(Del ref)
<b>Interfase continental</b>		
<b>Geosistemas</b>	<b>Geofacies</b>	<b>Clave</b>
I.- Litoral	1.- Cordones litorales	(Lit cor)
	2.- Isla barrera	(Lit bar)
II.- Palustre	1.- Intermareal de régimen ordinario	(Pal int or)
	2.- Intermareal de régimen extraordinario	(Pal int ext)
	3.- Supramareal	(Pal sup)
	4.- Emergente	(Pal em)
III.- Kárstico-palustre		(Car pal)
IV.- Fluvio-palustre	1.- Cautivo	(Fl pal ca)
	2.- Semicautivo	(Fl pal sca)
	3.- Activo	(Fl pal act)
V.- Fluvio lacustre- estuarino		(Fl lac es)
VI.- Fluvial		(Fl)
VII.- Depositional proluvio-aluvial		(Pri al)
VIII.- Automórfico		(Aut)

II.- *Geosistema de bajos intermareales dispuestos en un delta interior.*- lóbulos sedimentarios subacuáticos intermareales (*flood tidal shoals*), constituidos por arenas calcáreas y silíceas alóctonas. De conformación geomorfológica inestable, regulada por el flujo y reflujo de mareas y las corrientes litorales, que circulan a través de la Boca de Puerto Real. La fuente de sedimentos de la zona costero-marina (> 70% de carbonatos de calcio) entra al vaso lagunar, a través de una boca y se reagrupan y estabilizan temporalmente en bancos dispuestos a manera

de un delta. La carga más gruesa de fondo es depositada inicialmente, formando una estructura similar a la de los deltas homopícnicos, es decir: láminas basales, frente de avance y láminas a techo. Debido a la turbidez y la migración en los patrones de sedimentación y canales de marea, no existe colonización vegetal. Presenta los más altos promedios de salinidad ( $> 30$  ups) de todos los geosistemas en el área de estudio y según la época del año, la dirección de los flujos de agua mar-laguna cambia radicalmente (verano, mar-laguna, y nortes, laguna-mar).

*III.- Geosistema de estero.-* recinto acuoso polihalino (18-30 ups) alargado semicerrado por una línea de ribera (*shore line*) constituida por una alineación arenosa de acreción marina, resultado de la incidencia oblicua del oleaje. Albufera (*lagoon*) de márgenes estabilizadas por colonización vegetal de manglar rojo (*Rizophora mangle*). Presenta comunicación hidrodinámica natural hacia la laguna y artificial hacia mar abierto. Su funcionamiento ecológico está regulado principalmente por los regímenes y fluctuaciones intermareales.

*IV.- Geosistema limnológico.-* cuerpo de agua léntico costero tropical, de múltiples interacciones hidrológicas. Su emplazamiento geomorfológico sobre la depresión marginal deltaica de la cuenca Tabasco-Campeche, determina la confluencia de flujos de agua marinos y continentales con diferentes características hidrodinámicas y sedimentológicas. El resultado es una sedimentación terrígena diferencial y marino calcárea que genera rasgos geomorfológicos de transición entre ambientes marinos, fluvio-palustres y fluviales, según la energía relativa de las corrientes de deriva litoral, las mareas, el oleaje y los volúmenes de los flujos de agua fluvial.

*IV.1.- Geofacie limnológica-central.-* cuerpo de agua limnético mesohalino (5- < 18ups) y oligomíctico. Mesohalino, porque dentro de las aguas salobres no rebasa las 18ups y oligomíctico porque la temperatura se mantiene constante todo el año, con gradientes térmicos débiles ( $< 4^{\circ}\text{C}$ ) y circulación vertical irregular. Es la unidad del paisaje más representativa del vaso lagunar, y aunque tiene influencia de corrientes litorales marginales, mantiene más o menos homogéneas sus características físico-químicas durante todo el año. Presenta la mayor profundidad promedio del sistema lagunar (4.0 m). Es un área de transición entre la zona de influencia marina y la fluvio-lagunar, sin rasgos morfológicos específicos en el piso lagunar. Aunque dominan los sedimentos limo-arcillosos, las arenas calcáreas de transición (entre el 50 y 60 % de carbonatos de calcio) se encuentran interdigitadas, debido a los frentes de avance extraordinario durante los temporales de verano.

*IV.2.- Geofacie limnológica-marina.-* cuerpo de agua limnético-marino polihalino. Se le denomina limnético por su afinidad hidrodinámica con cuerpos de agua de poca movilidad (entre 2 y 3 cm/s) y

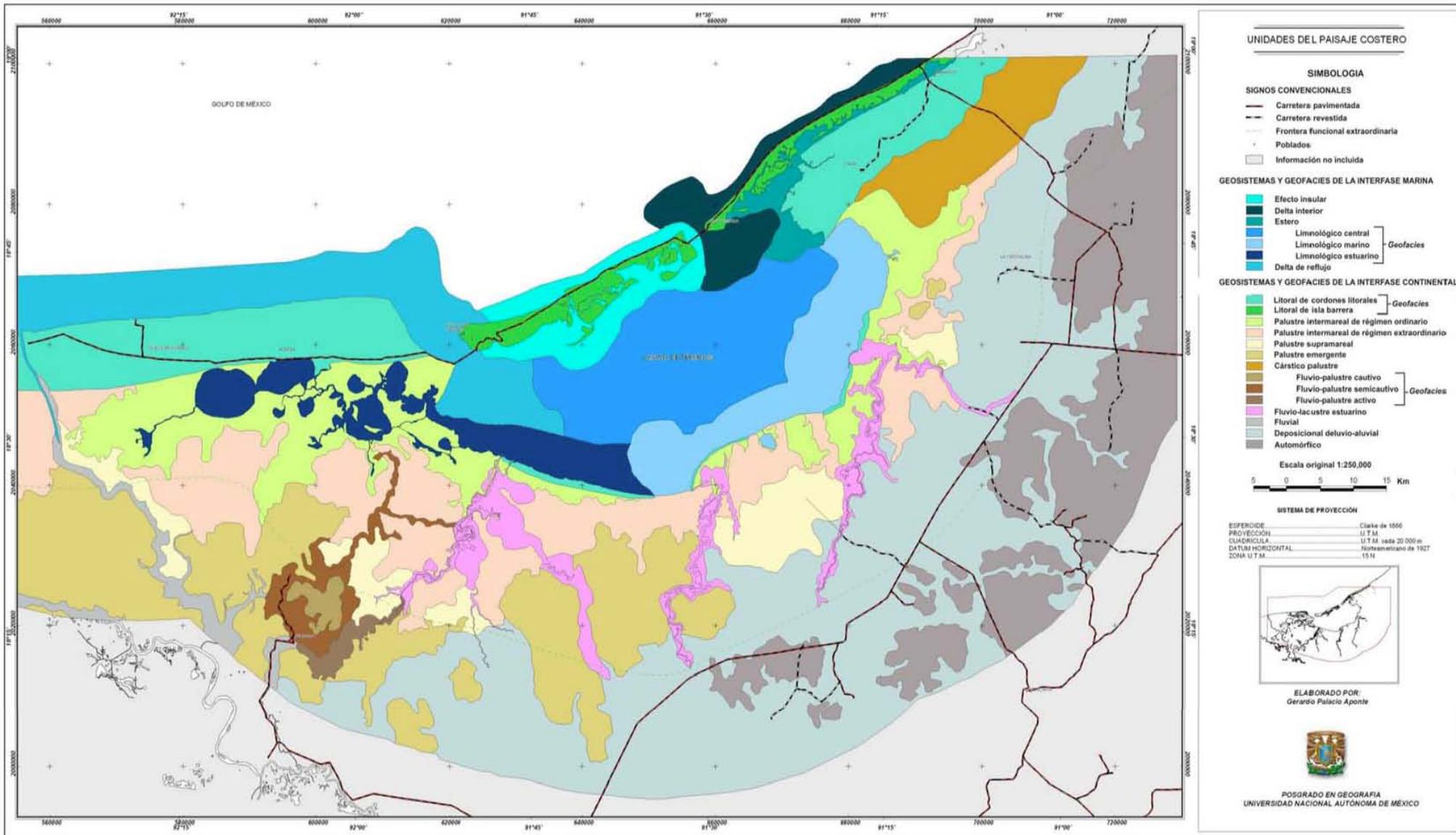


Figura 23.- Unidades del paisaje costero en la Laguna de Términos, Camp.

marino por su influencia sobre los gradientes de salinidad y sus implicaciones ecológicas en el emplazamiento de la vegetación acuática. Debido a su ubicación sobre el litoral lacustre sureste, supone una influencia continental mayor, sin embargo, debido al proporcionalmente limitado aporte de los efluentes de los ríos Candelaria y Chumpán (24%) al total del agua dulce que entra a la laguna, las características marinas dominan. Los promedios de transparencia ( $> 40\%$ ) y salinidad (entre 20 y 25 ups) en el agua permiten el desarrollo de comunidades de pastos marinos (*Thalassia testidium*). En esta geofacia se presenta la acumulación de sedimentos arcillosos típicos de ambientes acuáticos lénticos.

*IV.3.- Geofacie limnológica-estuarina.-* cuerpo de agua limnético-estuarino mesohalino. Dentro del vaso lagunar es la zona, donde el peso ambiental de la influencia continental es mayor. Esto debido a que los aportes de agua dulce asociados, representan el 76% del total que ingresa a la laguna, a través de Río Palizada ( $288 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  de caudal promedio anual). Por otra parte la predominancia de silicatos por sobre los carbonatos ( $< 40\%$ ) en los depósitos fluvio-lacustres, confirman la importancia de la influencia continental. Las plumas de turbidez son persistentes a lo largo del año, aún en la época seca. La salinidad refleja los gradientes típicos estuarinos entre aguas dulces y ambientes mesohalinos ( $< 18$  ups).

*V.- Geosistema delta de reflujos.-* recinto acuoso de reflujos intermareales y deriva litoral. Dentro de su ámbito de influencia se encuentran las corrientes resultantes del sinergismo hidrológico fluvio-lacustre con el contraflujo intermareal y de deriva litoral. Las corrientes de turbidez muestran un patrón incipiente de distribución deltaico de los sedimentos hacia la pendiente marina. Evidencian la dirección predominante del flujo mar-laguna, durante la época seca y en sentido contrario, durante la época de nortes. No presenta rasgos morfológicos significativos debido a la menor cantidad de arenas calcáreas y fragmentos conchíferos disponibles en este sector de la franja litoral ( $0.043\text{mg/l}$  de materia particulada-turbidez media).

#### **b).-Interfase continental.**

*I.- Geosistema litoral.-* paisaje de transición resultado de la tensión funcional entre ambientes continentales y marinos. La influencia relativa se expresa por sectores acuáticos, subacuáticos y terrestres de transición con amplitudes diversas. Las geoformas son indicadoras de la geodinámica costera y ambiental dominantes.

*1.1.-Geofacie litoral de cordones.-* planicies marino-eólicas onduladas, formadas por depósitos arenosos carbonatados-silíceos. Son resultado de una sucesión de cordones litorales alineados y parcialmente estabilizados por vegetación costera. Forman parte de la morfología subacuática costero-marina de zonas con gran provisión de materiales y deriva litoral intensa. Ambientalmente presenta ecotonos marinos, palustres y eólicos. La morfología que caracteriza este geosistema es resultado de la combinación de procesos acumulativos fluvio-marinos y marinos, desde principios del Holoceno (10,000 años). Los sedimentos arenosos de origen calcáreo y los terrígenos que convergen al sistema, se distribuyen longitudinalmente a la costa, en bermas que emergen gradualmente y se estabilizan para formar cordones litorales. Entre cada cordón se forman depresiones alargadas, que tienden a colmatarse de sedimentos finos y orgánicos para convertirse en albuferas o marismas. Sobre los cordones geomorfológicamente recientes se desarrollan playas y dunas litorales. Las dunas litorales pueden considerarse debidas a procesos de predominio terrestre, y quedan localizadas en el límite externo (hacia el mar) de la franja de transición, o sobre una isla barrera; en cualquier caso, sobre la playa alta (*backshore*) y fuera del dominio normalmente batido por el oleaje. Por su morfología y origen, estas formas constructivas son equiparables a las de ambientes eólicos, si bien aquí suelen presentar mayor colonización vegetal. A cada geoforma le corresponde un tipo de suelo; a los camellones regosol calcárico y a las depresiones gleysol eútrico. De las dos unidades el regosol es semihidromórfico y el gleysol hidromórfico, afectado por inundaciones, tanto de origen pluvial como marino. La cubierta vegetal se puede diferenciar morfológica y estructuralmente en especies rastreras y arbustivas (*Coccoloba uvifera*, *Batis marítima* e *Ipomoea pes-caprae*) y arbóreas (*Avicennia germinans* y *Conocarpus erectus*).

*1.2 Geofacie litoral de isla barrera.-* planicie marino-eólica subhorizontal conformada por islas barrera de depósitos subaéreos arenosos carbonatados-silíceos. Se forman de dos etapas morfogenéticas: primero, se forman cúmulos de arena donde se reagrupan y estabilizan los materiales que se mueven por deriva litoral, provocando acreción más o menos localizada y transitoria. En una segunda etapa, los cúmulos originalmente separados por canales de marea, se unen gradualmente por abanicos de deslave. Una vez estabilizados cúmulos y abanicos, se integran en un continuo de planicies angostas, que tienden a estabilizarse con vegetación costera. Posteriormente los abanicos de deslave sólo aportarán sedimentos desde el mar hacia el interior de la laguna en temporales extraordinarios. Por

su procedencia primaria, antes de incorporarse al ciclo litoral para formar acumulaciones, los sedimentos pueden clasificarse en: "alóctonos", aportados por corrientes fluviales; "paraautóctonos", aportados por procesos eólicos; y "autóctonos", desarrollados por la actividad biológica en estas aguas. Sobre los materiales estabilizados se forman regosoles calcáricos colonizados principalmente por especies vegetales rastreras (*Coccoloba uvífera*, *Batis marítima* e *Ipomoea pes-caprae*)

*II.- Geosistema palustre.-* planicies acumulativas inundables formadas por arenas biogénicas, terrígenos y material orgánico de origen vegetal. Debido al origen deposicional geológicamente reciente de la Laguna de Términos, a su emplazamiento sobre una depresión marginal deltaica y a los aportes de agua marinos y terrestres, en esta zona existe una predisposición natural para la formación de planicies anegadas. Permanecen inundadas temporal o permanentemente por las mareas, los desbordes fluviales o el estancamiento de aguas pluviales. En función de los ritmos de fluctuación de las inundaciones y su relación con los ambientes costero-marinos, se identifican cuatro variantes principales.

*II.1.- Geofacie palustre intermareal de régimen ordinario.-* planicies marino-palustres subhorizontales formadas por un complejo de materiales detríticos finos carbonatado-silicatados y biógenos, que permanecen prácticamente inundadas todo el año por el nivel medio de mareas (0.42 m). Estos materiales, en un arreglo general, pueden considerarse distribuidos, en forma de bandas, que tienden a ser paralelas a la línea de costa, donde los más arcillosos se acumulan en las áreas más cercanas al continente y los más arenosos en las zonas más distales. La transición entre una y otra de estas bandas es gradual. Cada una de estas bandas recibe un nombre según sea el componente litológico que predomina (Reineck, 1972). Así pues, se denomina llanura de fango (*mud flat*) a la más proximal, llanura mixta (*mixed flat*) a la intermedia y llanura arenosa (*sand flat*) a la más distal. Se encuentran en ambientes de baja energía en oleaje, detrás de islas barrera y planicies de cordones litorales. A partir de acumulación interestratificada de sedimentos, se originan suelos hidromórficos (solonchak gléyico y gleysol éutrico) colonizados por vegetación hidrofítica de mangle (*Rhizophora mangle* y *Avicennia germinans*) con tallas por sobre los 10 m promedio.

*II.2.- Geofacie palustre intermareal de régimen extraordinario.-* planicies marino-palustres subhorizontales formadas por un complejo de materiales detríticos finos carbonatado-silicatados y

biógenos, inundadas por el nivel promedio entre la pleamar ordinaria y la pleamar viva durante los equinoccios (0.923 m). Son ambientes subaéreos cuyos fondos quedan expuestos en periodos cortos. Sobre estos materiales se desarrollan suelos hidromórficos de los tipos gleysol mólico y vértico de textura media a fina, resultado de la mezcla de arenas y arcillas. Dentro de esta geofacie se encuentra un ecotono hacia ambientes más continentales con menos energía hidrodinámica marina, donde se acumulan sedimentos finos que al depositarse forman estratos lodosos (*mud flat*). En el conjunto de la geofacie dominan las comunidades de tular (*Typha dominguensis*) y carrizal (*Phragmites australis*).

*II.3.- Geofacie palustre supramareal.-* planicies marino-palustres subhorizontales formadas por un complejo de materiales detríticos finos carbonatado-silicatados y biógenos, afectadas por inundaciones de mareas extraordinarias (arriba de la pleamar máxima). Inundaciones asociadas al prisma de ascenso del nivel del agua por marea de tormenta e intrusión salina durante la época de huracanes. Estas inundaciones invaden los terrenos bajos de manera interdigitada entre 17 y 25 km tierra adentro. A diferencia de la geofacie anterior, la biomasa de tulares y carrizales es mayor y más enraizada. Elementos arbustivos y arbóreos de selvas bajas empiezan a colonizar esta unidad del paisaje.

*II.4.- Geofacie palustre emergente.-* planicies palustres subhorizontales formadas por un complejo de materiales detríticos finos silicatados y biógenos. Terrenos de inundación regulada por la acumulación de precipitaciones pluviales (época de lluvias y temporales) y los desbordes fluviales, donde la influencia mareal está ausente. Están asociadas a las denominadas terrazas del Mioceno y a mantos de acumulación proluvio-aluvial distal. En 90 metros sobre la horizontal, la pendiente se incrementa hasta 2° de inclinación, a partir del nivel de base general, dando origen a un ecotono entre humedales y terrenos relativamente elevados. La inundabilidad del terreno origina suelos hidromórficos y semihidromórficos del tipo gleysol vértico y mólico. Sobre estas planicies ligeramente inclinadas pero inundables, crece vegetación mesofítica de selva baja y mediana subperennifolia. Las especies arbóreas más representativas de la selva baja son *Annona glabra*, *Haematoxylum campechianum* y *Tabebuia rosea*, y forman bosquetes compactos con alturas inferiores a 10 m. Por otra parte, hacia el occidente de la geofacie, entre los manglares y las planicies fluviales, aparecen arbustos trepadores leguminosos de *Dalbergia brownwi* y *Dalbergia glabra*. En parches relictuales de

selva mediana se presentan especies arbóreas de *Lonchocarpus guatemalensis*, *Malvaviscus arboreus*, *Bucida sp.* y *Tabebuia sp.*, como los más representativos. Un indicador herbáceo de inundabilidad en ambientes continentales es la *Bravaisia tubiflora*, que aparece asociada dentro de las selvas bajas y medianas.

*III.- Geosistema kárstico-palustre.-* planicie estructural cárstica subhorizontal, ligeramente karstificada, formada por calizas margosas de inundación semipermanente. Debido a la disolución por surgencias o manantiales de pequeño caudal, de alimentación alóctona y de tipo intermitente, se han desarrollado en forma incipiente, exoformas kársticas dentro de ambientes deposicionales inundables. El agua subterránea tiene sus principales afloramientos en este geosistema y representa el 0.03% del total de dulce que entra al sistema costero del área de estudio. Aunque existen depósitos palustres que cubren la planicie, los elementos kársticos del paisaje son evidentes. Predominan suelos semihidromórficos e hidromórficos tipo gleysol vértico y éutrico y elementos sabanoides herbáceos (*Paspalum notatum*, *Paspalum virgatum* y *Cyperus rotundum*) y arbóreos (*Crescentia cujete* y *Curatella americana*).

*IV.- Geosistema fluvio-palustre.-* planicies fluvio-palustres subhorizontales formadas por depósitos aluvio-biógenos. Es un geosistema que integra morfogénesis y dinámicas hidrológicas diferentes. Los cauces fluviales lóticos, normalmente de caudales en movimiento, se integran funcionalmente a terrenos deprimidos que se convierten en colectores permanentes y/o temporales de agua prácticamente estancada. Sin embargo, este geosistema presenta variantes en su funcionamiento considerando su dinámica geomorfológica.

*IV.1.- Geofacie fluvio-palustre cautiva.-* planicies fluvio-palustres subhorizontales formadas por depósitos aluvio-biógenos resultado del arreglo caótico de paleocauces, que han perdido sus caudales por asentamientos diferenciales del terreno y cambio en la dirección de los efluentes. Se agrupan en zonas topográficamente por debajo del nivel de terrazas deposicionales, convirtiéndose en cuerpos lacustres eurihalinos (30-40ups) temporales. Las conexiones hidrológicas fluviales se han perdido por avulsión o abandono del lecho por sobredimentación, salvo en el caso de temporales extraordinarios. Son *basines* o zonas de estancamiento de agua alojadas sobre terrenos cóncavos de antiguas llanuras de desborde.

*IV.2.- Geofacie fluvio-palustre semicautiva.-* planicies fluvio-palustres subhorizontales formadas por depósitos aluvio-biógenos de comunicación temporal entre lagunetas y meandros de configuración

inestable, temporalmente activos. Generalmente son meandros abandonados o cauces en proceso de estabilización, que divagan sobre planicies anegadas y que presentan caudales en época de lluvias.

*IV.3.- Geofacie fluvio-palustre activa.-* planicies fluvio-palustres subhorizontales de desborde, formadas por depósitos aluvio-biógenos. Planicies construidas entre ríos meándricos o trezados, de gradientes longitudinales  $< 1\%$ . El caudal rebasa su cauce durante los periodos de crecidas invadiendo la llanura lateralmente y produciendo sedimentación diferencial. Al repetirse este comportamiento en ciclos estacionales, se desarrolla un hidrosistema fluvio-palustre interconectado de planicies fluviales inundables, caños (cauces temporalmente activos) y lagunetas de crecida. Estas lagunetas son cuerpos de agua cautivos que no pueden regresar al cauce fluvial y permanecen, incluso con agua, durante la época seca. Las más pequeñas tienden a secarse y cubrirse de herbáceas de *Paspalum notatum*, *Paspalum virgatum* y *Cyperus rotundus*.

*V.- Geosistema fluvio lacustre-estuarino.-* recinto acuático estuarino, emplazado sobre planicies fluvio-lacustres, formadas por depósitos aluvio-biógenos, arenas calcáreas y corazas calcáreas. Es un geosistema complejo influenciado por procesos hidrodinámicos longitudinales, laterales y verticales de deriva estacional. En el mismo hidrosistema interactúan activamente procesos fluviales, lacustres y marinos. En función de la intensidad relativa y los tipos de interacciones se pueden diferenciar tres subzonas: baja, media y alta. En la baja existe un encuentro frontal entre el prisma mareal que entra a la Laguna de Términos por las bocas del Carmen y Puerto Real y el caudal fluvial de los ríos de la región, originando cuerpos fluvio-lacustres de influencia marina distal en ambientes mesohalinos continentales. El fondo sedimentario muestra relictos geomorfológicos de frentes de avance deltaico y de llanuras de desborde, que migraron en el pasado y sobre las cuales se alojan los cuerpos de agua lénticos. Desde el punto de vista sedimentológico, existe una transición entre facies clástico-silíceas y facies litorales de arenas calcáreas (fragmentos conchíferos) afectadas por mareas. La subzona media está compuesta por ambientes estuarinos oligohalinos (0.5-3.0 ups), producto de la mezcla de mayores volúmenes de agua dulce (fluvial) y menores de agua salobre (lacustre). Las proporciones relativas de estos volúmenes ocasionan deriva estacional (lluvias-secas) de los gradientes longitudinales de salinidad. Presentan alta turbidez en la época de lluvias y predominio de depósitos de grano fino y fragmentos vegetales. Finalmente, la subzona alta del geosistema o estuario alto, se encuentra aguas arriba sobre los lechos fluviales, con salinidades de 0.1ups y 0.0 ups, y deriva longitudinal sólo durante mareas extraordinarias y cuñas salinas ocasionadas por

temporales (huracanes y tormentas tropicales). Se encuentran evidencias erosivas incipientes de modelado fluvial.

*VI.- Geosistema fluvial.-* lecho fluvial encajado sobre planicies estructurales de materiales calcáreos consolidados y depósitos fluvio-deluviales. El canal está encajado en su cauce sin apenas depósito, o divaga sobre el mismo, formando una llanura aluvial. Son de cauce y canal únicos y corresponden a ríos con pendientes longitudinales escasas y abundante carga en suspensión o mixta, aunque la de fondo suele ser inferior al 11% del total transportado. Frente al carácter eminentemente erosivo en cauces únicos rectilíneos y sedimentarios de los múltiples, éstos se califican como erosivo-sedimentarios. Característico igualmente es el “flujo helicoidal”, debido a la superposición del desplazamiento transversal y longitudinal en la corriente, dando lugar a efectos erosivo-sedimentarios: erosiona y carga sobre el lado externo de un arco, depositando el material sobre el lado interno del siguiente. Las llanuras aluviales en este tipo de ríos, forman una banda irregular a ambos lados del canal, siguiendo la dirección del caudal y deben su origen a tres procesos asociados: retroceso del escarpe de orilla, acreción en barras marginales y terracetos fluviales, y enlace-coalescencia para los sucesivos cuerpos acrecionales. La vegetación riparia asociada a este geosistema incluye comunidades de selva mediana (*Inga vera*, *Lonchocarpus luteomaculatus*, *Machaerium falcifrome*), tasistales (*Acoelorrhapha wrightii*) y elementos sabanoides (*Crescentia cujete*).

*VII.- Geosistema deposicional deluvio-aluvial –* planicies deluvio-fluviales acumulativas, onduladas, formadas por un complejo de depósitos aluvio-deluviales. Son resultado de la acumulación sucesiva de capas de material edáfico y fragmentos menores desprendidos por denudación laminar interfluvial y arrastrados, cuesta abajo, por incidencia de la gravedad. Es la morfología típica de transición entre lomeríos bajos y llanuras fluvio-deltaicas, donde entran en coalescencia los depósitos de piedemonte, con los detritos finos de desborde fluvial actuales y los mantos de desborde de antiguas planicies intradeltaicas. Los procesos agradativos están regulados por el área de captación adyacente, la carga de sedimentos en el agua, el régimen hidrológico (estacional) y la gravedad. De esta forma, la distribución de sedimentos muestra patrones asociados a la importancia relativa de la energía hidráulica o la gravedad. Debido a la diversidad de procesos geomorfológicos activos se encuentran ecotonos edáficos entre gleysol éutrico y vertisol pélico. La vegetación asociada incluye comunidades de selva mediana (*Inga vera*, *Machaerium falcifrome*), (*Acoelorrhapha wrightii*) y elementos sabanoides (*Crescentia cujete*).

*VIII.- Geosistema automórfico.-* colinas kársticas, tabulares bajas (20 msnm), semisepultadas de geometría convexa, y planicies estructurales bajas de corazas calcáreas (> 50 msnm). Este geosistema tiende a dispersar o a infiltrar el agua más que acumularla, por lo tanto, se encuentra libre de inundaciones, salvo en casos de inundaciones extraordinarias. Debido a la dominancia de procesos denudativos por sobre los acumulativos, se desarrollan suelos esqueléticos automórficos tipo leptosol réndzico. Sobre calizas meteorizadas se produce un desgaste paulatino y generalizado, que se presenta, cuando la cantidad de agua producto de las precipitaciones es mayor a la capacidad de absorción del subsuelo. La vegetación que cubre este geosistema es de selvas bajas subperennifolias extendidas y bosquetes de selvas medianas subperennifolias.

### **II.3.- Índice de conectividad costera en Laguna de Términos, Campeche.**

Una vez establecido el sistema de clasificación de unidades del paisaje costero en la Laguna de Términos, se aplica el índice de conectividad desarrollado en el capítulo I. Este índice incluye los vínculos geocológicos aplicables para el área de estudio entre unidades del paisaje contiguas. Identifica, a partir de variables cuantitativas y semicuantitativas, la conectividad en términos funcionales.

Se establecieron cuatro rangos de conectividad, desde alta, media, baja y muy baja (Fig.24). A mayor conectividad, mayor presencia de elementos o procesos vinculantes entre interfases y unidades del paisaje contiguas. El concepto de conectividad nula o inexistente no se presenta en el paisaje costero del área de estudio, debido a la alta movilidad del ambiente acuático y la variabilidad de las fronteras de inundación en ambientes terrestres. El equivalente de la menor cantidad de vínculos funcionales evidentes es la conectividad muy baja y significa que de todos los vínculos potenciales, sólo se presentan algunos de forma aislada o en periodos de tiempo cortos.

El rango de conectividad alta, se presenta entre las geofacias, palustre intermareal de régimen ordinario (interfase continental) y limnológica estuarina (interfase marina). Es resultado de modalidades de influencia corológica recíproca y unidireccional, reguladas por la morfodinámica de cuerpos de agua semicautivos heredados de antiguos frentes de avance deltaico, y prismas de agua estuarinos, que se encuentran en ambientes limnéticos. En este espacio morfogenético, dominan los subprocesos hidrodinámicos de marea y escorrentía fluvial, que originan gradientes estuarinos y materiales sedimentarios de transición.

Igualmente, se presenta conectividad alta, entre la geofacie limnológica estuarina (interfase marina)

y la geofacie litoral de cordones litorales (interfase continental), como evidencia relictual de antiguas líneas de costa que fueron confinadas por acumulación de terrígenos, y que actualmente están reguladas en su funcionamiento, por el régimen intermareal. Los índices de adyacencia en los dos casos de conectividad alta, son de más del 90%, lo que implica estrechos vínculos geocológicos y de génesis del paisaje, a lo largo de la fronteras compartidas. De los 32 vínculos potenciales, en variables asociadas a los subprocesos y elementos del paisaje costero, se presentan 22, lo que origina un valor promedio de 0.68 en el índice de conectividad. En la conectividad alta, no dominan grupos de procesos por ámbitos de influencia marina o continental, siempre se establecen gradientes de transición resultado de interacciones en equilibrio.

La conectividad media se observa entre las geofacies palustres intermareales de régimen ordinario y extraordinario (interfase continental) y la geofacie limnológica marina (interfase marina). El subproceso esencial que condiciona el resto de los subprocesos, es la movilidad vertical ordinaria y extraordinaria de las mareas, en su expresión corológica. El índice de adyacencia se reduce hasta el 50%, debido a la inclusión de ecotonos de transición, con mayor peso de influencia continental o marina. De los 32 vínculos potenciales, se presentan 16, originando un índice de conectividad de 0.5. Aunque las evidencias de conectividad marina y continental son aún compensadas funcional y territorialmente, la presencia relativa del ambiente marino empieza a ser dominante. La conectividad media presenta una particularidad y es que a diferencia de los otros rangos, también se puede expresar en forma de difusión corológica vectorial o direccional. A partir de un punto de dispersión u origen, como una boca o una desembocadura estuarina, orienta o dirige su ámbito de influencia. Este es el caso del geosistema fluvio-lacustre-estuarino, que aunque es de naturaleza acuática continental, se vincula hidrológicamente con el geosistema limnético, a través de desembocaduras estrechas que conducen y regulan la percolación de flujos hidrológicos bidireccionales, continente-mar-continente. Aunque su índice de adyacencia es mayor al 50 %, para estas geofacies tiene menor relevancia corológica, debido a que tienen la misma morfogénesis. El índice de conectividad se ubica en 0.32, por debajo de 10 variables asociadas a los subprocesos y elementos del paisaje costero.

El menor índice de conectividad (baja) resulta de la colindancia entre el geosistema de efecto insular (interfase marina) y la geofacie litoral de isla barrera (interfase continental), por una parte, y por otra, entre ésta última y la geofacie de delta interior (interfase marina) y el geosistema de estero. En ambos casos, su emplazamiento litoral, los vincula en forma directa a los ambientes litorales marinos, más que a la interfase continental. Predominan los ambientes sedimentarios marinos de facies carbonatadas, que sólo mantienen

vínculos funcionales estacionales o extraordinarios de turbidez de origen terrígeno o de baja salinidad por aportes de agua fluvial. La geofacie de isla barrera está formada, en menor proporción, por terrígenos que dejan en evidencia el vínculo que en algún momento existió entre los aportes sedimentarios continentales y los marinos. Los geosistemas y las geofacies de conectividad baja, mantienen cierto grado de independencia funcional, pero con vínculos de origen o subprocesos y elementos paisajísticos de ambas interfases.

Para la Laguna de Términos, la conectividad muy baja se presenta en el ambiente acuático marino (interfase marina). Son cuerpos de agua con altos niveles de intercambio hidrodinámico, que no muestran evidencias visibles directas o indirectas de vínculos funcionales promedio o semipermanentes. Los subprocesos hidrodinámicos inestables, como la turbidez o la salinidad varían en función de la época del año o según eventos o fenómenos naturales extraordinarios, condicionando áreas de influencia transitoria u ocasional. En el área de estudio, y según los principios de interacción entre interfases, la geofacie limnológica central, aunque se encuentra hidrogeomorfológicamente ligada a las otras geofacies limnológicas, no muestra vínculo funcional alguno con geosistemas o geofacies de la interfase continental.

La expresión territorial de la conectividad permite ubicar zonas, por sector costero, donde las presiones antrópicas se puedan ver magnificadas, debido a su complejidad funcional intrínseca. Se parte del supuesto de que entre la fragilidad del paisaje y la complejidad funcional existe una relación directamente proporcional, en donde a mayor complejidad, mayor fragilidad. Chiappy (1996) define la fragilidad ecológica como la susceptibilidad de los ecosistemas ante el impacto ocasionado, ya sea por los procesos naturales, o bien, por las diferentes acciones antropogénicas a que pueden estar expuestos.

Finalmente, el índice de conectividad es el concepto medular que sustenta el porqué, el paisaje costero, sólo se puede concebir como resultado de interacciones entre interfases colindantes de distinta naturaleza u origen.

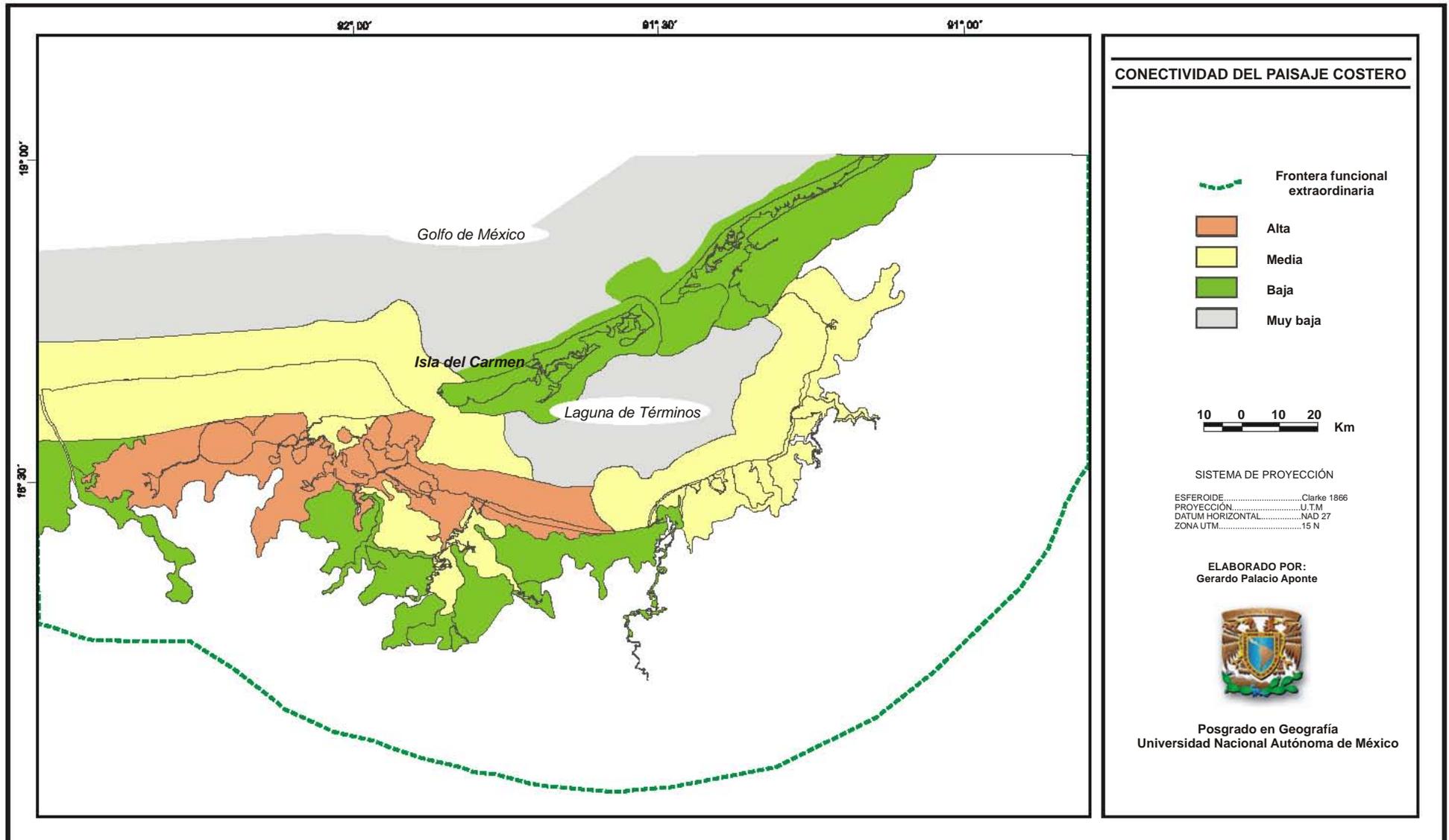


Figura 24.- Conectividad del paisaje costero en la Laguna de Términos, Camp.

**CAPÍTULO III****III.- GEOINDICADORES DE CAMBIOS EN EL PAISAJE COSTERO Y DIAGNÓSTICO AMBIENTAL****III.1.- Concepto y tipificación.**

El manejo de la zona costera es concebido como la planificación y regulación multisectorial basada en las características y necesidades de segmentos costeros pequeños, angostos y geográficamente bien delimitados. Incluye como primera etapa, el diagnóstico ambiental como un proceso de evaluación donde se identifican los componentes naturales disponibles y su estado ambiental, así como los componentes y actividades antrópicas que los presionan. Establece los conflictos actuales y potenciales entre usos y recursos, así como las necesidades, en términos de atención ambiental y de infraestructura. Con frecuencia este proceso se ampara en una colección de datos multidisciplinarios poco efectivos o inadecuados, en términos de respuestas rápidas y de interpretación para los tomadores de decisiones. Para evitar acumular un conjunto de datos valiosos, pero con frecuencia orientados a objetivos científicos o diagnósticos puntuales, es que se propone el uso de geoindicadores de cambios significativos en el paisaje.

Como antecedente, existen indicadores ambientales de diferentes tipos, desde ecológicos para monitorear la biodiversidad y la integridad ecológica, hasta índices de sustentabilidad para objetivos múltiples. La mayoría de los indicadores debido a su propia concepción, aportan datos basados en muestreos puntuales, objetivos particulares y áreas restringidas, sin considerar su entorno territorial ni sus áreas de influencia relativa. Sin embargo, existen otros índices que si aportan algunos conceptos susceptibles de ser evaluados territorialmente, como los propuestos por Cooper *et al.* (1994), Berger, A.R. *et al.* (1996), Dale y Beyeler (2001) y Morton (2002a). El primero enfoca su análisis a los ambientes estuarinos, calculando un índice de salud, compuesto por una base física (geomorfológica), estudios de calidad del agua, evaluación de la calidad biológica y un valor de calidad estética. Posteriormente Berger *et al.* (1996), organiza una reunión de especialistas en ciencias naturales, y elabora una guía de geoindicadores relevantes que muestren cambios ambientales antropo-

naturales significativos y sus tendencias en ambientes terrestres. Por su parte, Dale y Beyeler (2001) crean un índice ecológico que se basa en los cambios de la composición, estructura y función de los ecosistemas a tres niveles de organización territorial, según la fragmentación de hábitats. Finalmente y con el antecedente de Berger *et al.* (1996), Morton (2000a) propone geoindicadores para ambientes costeros tropicales, identificados por la dinámica e importancia de sus cambios geomorfológicos en las últimas décadas.

Para el presente trabajo, se retoma el concepto de geoindicador y se adapta según criterios espaciales precisos, basados principalmente en las unidades del terreno costero y sus principios teórico-metodológicos. Los geoindicadores son medidas (magnitudes, frecuencias, promedios, y tendencias) de procesos naturales y antrópicos que ocurren sobre o cerca de la superficie terrestre y que muestran cambios medioambientales significativos (catastróficos o graduales) en tiempos humanos (periodos de 100 años o menos). Se usan para monitorear y evaluar cambios ambientales, proporcionando referentes importantes para entender los factores estresantes, inducidos por el hombre o por la naturaleza (Berger *et al.*, 1996). Permiten evaluar el estado de salud o funcionamiento de los ambientes y sus ecosistemas y aunque se concentran en elementos abióticos, también se incluyen elementos bióticos representativos y de origen humano. En conjunto, los geoindicadores son la métrica del estado ambiental de las unidades del paisaje costero.

La condición del medio ambiente es reflejo, no sólo de la influencia humana, sino también de los procesos y fenómenos naturales, sin embargo, en ocasiones es especialmente complejo diferenciar su origen, por lo que cuando el caso lo amerita se usan geoindicadores complejos.

#### ▪ *Tipos de geoindicadores*

Los geoindicadores pueden ser simples o complejos según su origen, número de procesos o variables involucradas y variabilidad temporal. Simples, cuando el origen es claramente reconocible como natural o antropogénico y los procesos involucrados en su dinámica espacio-temporal, son identificables y únicos en su génesis. En su comportamiento temporal presentan ciclos o periodos de ocurrencia específicos. Por otra parte, los geoindicadores complejos se presentan cuando la génesis de la perturbación ambiental es mixta o no claramente diferenciable por su origen, por lo tanto, involucran procesos de orígenes múltiples y ocurrencias impredecibles o extraordinarias.

### ▪ *Características de los geoindicadores*

Las características que, en forma óptima, deben considerar los geoindicadores para valorar consistentemente modificaciones ambientales de expresión espacial sobre terrenos de homogeneidad relativa son:

- **Naturaleza:** ámbito o fuente en el que se origina.
- **Descripción:** en qué consiste el indicador, que expresa en términos de diagnóstico ambiental.
- **Significancia:** si el evento o fenómeno de cambio es relevante en términos de afectación al orden natural o antrópico preestablecido.
- **Causas:** identificar si el origen es natural, antrópico o combinado.
- **Ambiente en el cual es aplicable:** se especifica a qué tipo de paisaje costero se puede aplicar.
- **Sitios de monitoreo:** se especifica dónde se realizarán los monitoreos, considerando sobre todo, la variabilidad de ambientes abiertos y la complejidad espacial y temporal del proceso.
- **Escala espacial:** a qué extensión territorial es aplicable. Unidades del terreno a diferentes niveles jerárquicos, desde exploratorio ( $< 1:250,000$ ) hasta detallado ( $> 1:25,000$ ).
- **Método para medirlo:** cómo es medido en campo, técnicas de análisis (laboratorio, percepción remota, muestreo de parámetros in situ, etc.). Ubicación georeferenciada de los sitios de muestreo.
- **Frecuencia con la que será medido:** dependiendo de la naturaleza del ambiente y del geoindicador se podrá definir la frecuencia de los monitoreos, evitando ruidos que arrojen información falsa.
- **Aplicaciones hacia el pasado y el futuro:** cuando el geoindicador sirve para reconstrucciones paleoambientales o bien para la construcción de escenarios.
- **Umrales:** dentro de qué parámetros o rangos físicos, químicos, biológicos y ecológicos se ubica el geoindicador. Cuáles serían los límites del comportamiento promedio o extremo.
- **Analogías geográficas:** cuáles serían los procesos y procedimientos fundamentales repetibles y aplicables para ambientes similares.
- **Sensibilidad:** susceptibilidad a cambios en el estado de los factores claves que mantienen la integridad funcional de los ecosistemas.
- **Medible fácilmente:** con error mínimo y con métodos estándares.
- **Eficiente en la relación costo-beneficio:** proveer la máxima información por el mínimo de tiempo, personal y dinero.

### III.2.- Geoindicadores para el diagnóstico ambiental en ambientes costeros.

Los geoindicadores para los ambientes costeros adaptan sus características a las superficies de transición mar-continente, reguladas por la fluctuación de los niveles de agua marina (altura relativa del nivel del mar), los niveles de inundación palustre, los desbordes fluviales y las interacciones entre ellos. Los geoindicadores costeros incorporan en su evaluación la ubicación latitudinal y el clima subregional, así como los componentes bióticos y abióticos del paisaje. De manera, que las costas de los trópicos húmedos incluyen diferentes elementos de análisis, que los empleados en costas de zonas templadas o frías. Los de uso más frecuente para el diagnóstico ambiental en las zonas costeras de los trópicos húmedos son: reducción en la distribución de los humedales costeros (modificación de la cubierta), detección de cambios en la morfología costera (posición de la línea de costa), daños a los arrecifes coralinos, cambios en la composición y patrón de distribución de los materiales acumulativos, y cambios en la dinámica costera por actividad tectónica. Morton (2002a) señala que los geoindicadores costeros son especialmente sensibles a los procesos tectónicos regionales y a las alteraciones antrópicas, reflejando cambios significativos en los procesos fluviales, la hidrodinámica costera, la calidad del agua, el nivel promedio relativo del nivel del mar y el aporte de sedimentos.

Para el área de estudio, se han considerado los siguientes geoindicadores, como los más importantes en términos de los cambios sobre ambientes fluvio-marinos de zonas tropicales (Cuadro 8):

Cuadro 8.- Geoindicadores aplicados en el área de estudio.

<i>Geoindicador</i>	<i>Tipo de geoindicador</i>	<i>Método de evaluación</i>
Índice de modificación de la cubierta vegetal (análisis retrospectivo del estado de los ecosistemas)	Simple-Antrópico	Detección de cambio ponderado numéricamente mediante clasificaciones multitemporales de imágenes de alta resolución. Matriz de confusión a partir de tipificaciones de perturbación.
Detección de cambios en la morfología litoral. Posición relativa de la línea de costa. Detección de erosión-acreción.	Complejo-Natural (causas antrópicas asociadas)	Compuesto de color multitemporal con bandas del IRC (infrarrojo cercano) imágenes Landsat TM.
Susceptibilidad del terreno ante la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extraordinarios (huracanes).	Simple- Natural- Extraordinario	Análisis de la distribución espacial de las condiciones naturales del terreno que predisponen la capacidad del paisaje para amortiguar o magnificar la incidencia directa del fenómeno. Sumatorias ponderadas en unidades del terreno de condición única.

### III.2.1.-ÍNDICE DE MODIFICACIÓN DE LA CUBIERTA VEGETAL.

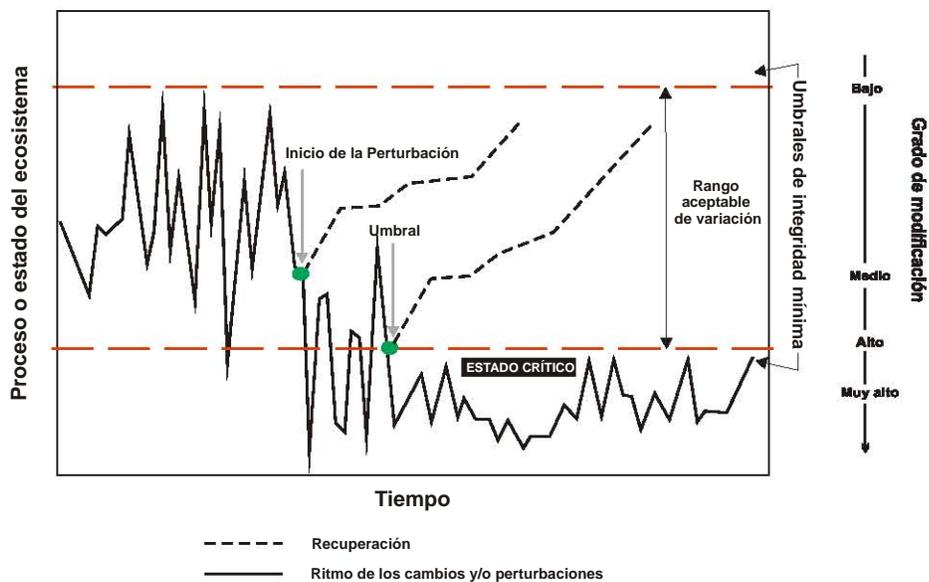
#### III.2.1.1.- Conceptualización y criterios de evaluación.

El impacto de las actividades humanas sobre el entorno natural es un proceso con expresión evidentemente territorial, vinculado con las formas de apropiación del paisaje, el nivel histórico-tecnológico de aprovechamiento de los recursos, las formas de uso del territorio y la densidad poblacional. Los ritmos de estos impactos, en magnitud y persistencia, determinan la intensidad de la afectación y la posibilidad de recuperación de la naturaleza o bien la pérdida definitiva de la integridad biológica y los recursos naturales. Para detectar los efectos de las actividades humanas sobre la estructura (horizontal y vertical) del paisaje, se tipifica, a partir de la cantidad y calidad original (potencial) de los elementos del paisaje, los grados de modificación o afectación al entorno natural. Este proceso puede seguir dos orientaciones: de tipo productivo-tecnológico o ecológico-ambiental. El primero se basa en el análisis de las condiciones actuales y potenciales del entorno para las actividades económicas, y el segundo, en evaluar la calidad actual de los elementos del paisaje en función de su estado ecológico original. Para evaluar el estado ambiental actual del área protegida Laguna de Términos se utiliza la segunda orientación, a partir de la cual se establecen órdenes jerárquicos de modificación. Estos órdenes toman como referencia algunos criterios de evaluación ecológica del paisaje planteados por Baudry (1984), Forman y Gordon (1986), Etter (1991), Berger *et al.*, (1996), Brown (1997), Farina (1998) y Turner (2001). Estos criterios generales han sido adaptados a las condiciones ecológicas propias de los humedales costeros tropicales y a las formas regionales de apropiación del territorio.

Los paisajes son sistemas en equilibrio dinámico y autorregulados, que se mantienen así, mientras son capaces de absorber las perturbaciones externas. Para detectar cuando los mecanismos de resistencia y recuperación son incapaces de restablecer el estado inicial del sistema es importante incorporar los conceptos de resiliencia y estado crítico (Fig. 25). La estabilidad de un sistema depende de su resistencia o capacidad para contrarrestar los efectos de la inestabilidad y, por otra parte, de la resiliencia o capacidad del sistema para volver al estado anterior o similar, una vez que haya terminado el evento perturbador. Estas dependerán del arreglo de los elementos que integran la unidad territorial y de la magnitud de la presión ejercida sobre ésta.

Una unidad territorial puede romper su capacidad de resistencia al manifestarse un agente de presión, y desplazarse hacia otro estado o condición, manteniéndose vigente la capacidad de retorno al estado previo, dentro de ciertos umbrales de variación. Cuando estas variaciones se ven influenciadas

predominantemente por factores no humanos (como el clima y las interacciones bióticas), puede decirse que ocurren dentro de un rango natural de variación. Sin embargo, cuando el sistema ecológico sufre una pérdida de integridad, es decir, de la composición, estructura y funcionamiento del paisaje debido a factores humanos, se rebasan los umbrales denominados de integridad mínima (Fig. 25) alcanzando el estado crítico (Drew ,1986). Este es el momento en que el sistema se reestructura radicalmente, a partir de los elementos destruidos y transita hacia un nuevo estado de funcionamiento. La integridad del sistema ecológico no puede restaurarse mientras que el factor alterado continúe excediendo esta condición.



Basada parcialmente en Drew, 1986

Figura 25.- Oscilación de las perturbaciones dentro del sistema ecológico.

El estado crítico se da justo en el momento en que el nivel de impacto o modificación se encuentra en el límite del nivel de recuperación. Si la presión persiste por sobre este nivel, se eliminan las posibilidades de regresar al estado original. En términos de grados de modificación, si se alcanzan niveles altos y muy altos es prácticamente imposible restaurar los paisajes naturales. Lo que ocurre regularmente cuando los paisajes tienden a antropizarse es la pérdida gradual o total de los elementos naturales, y por lo tanto, de la capacidad de recuperación. Por otra parte, cuando los grados de modificación son bajos y medios y que no han rebasado el estado crítico, las posibilidades de regeneración son viables (Fig. 25).

La perturbación se define como un evento discreto que rompe la estructura de un ecosistema,

comunidad o población y cambia la disponibilidad de recursos o al ambiente físico (Pickett and White, 1985). Si trasladamos este concepto a la estructura del paisaje, gradualmente se conformaría un mosaico de parches con distintos grados de modificación o perturbación. En este contexto, la visión paisajística de las perturbaciones, según Turner *et al.* (2001) tiene varios componentes (Cuadro 9):

Cuadro 9.- Componentes de la perturbación desde la visión paisajística.

<i>Término</i>	<i>Definición</i>
Frecuencia	Mediana del número de eventos promedio ocurridos en un punto por periodo de tiempo.
Intensidad	Energía física del evento por unidad de área y tiempo.
Residual	Organismos que sobreviven a una perturbación. Medida de la severidad y la Intensidad.
Intervalos de retorno	Medía o mediana del tiempo entre perturbaciones.
Periodo de rotación	Tiempo medio que permanece una perturbación en un área determinada.
Severidad	Efecto de las perturbaciones sobre los organismos, comunidades o ecosistemas. Esta estrechamente relacionada con la intensidad.
Tamaño	Área perturbada, la cual puede ser expresada como el área media por evento, por periodo de tiempo o porcentaje en un área de estudio por un periodo de tiempo.

Todos los componentes de la perturbación se incorporan en un modelo espacio-temporal basado en cuatro factores que caracterizan la dinámica del paisaje: frecuencia de las perturbaciones, tiempo de reestablecimiento, extensión espacial de las perturbaciones y tamaño del paisaje (Turner *op cit*). Éstos se resumen en dos parámetros claves representados en dos radios: tiempo y espacio.

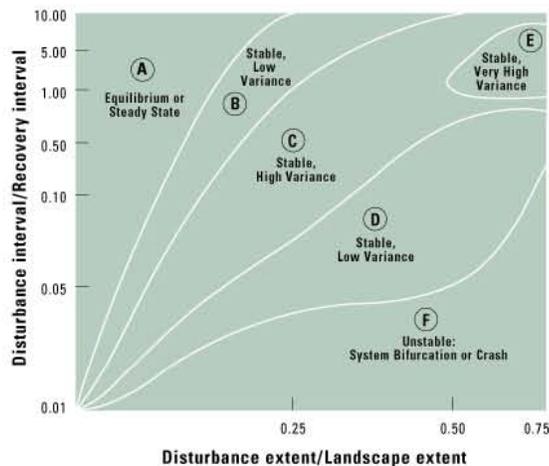
El parámetro **temporal** (T) refleja los intervalos de las perturbaciones contra el tiempo de restablecimiento y para medirlo se establecen tres estados cualitativos:

- El intervalo de perturbación es más largo que el tiempo de recuperación,
- El intervalo de perturbación y el tiempo de recuperación son iguales,
- El intervalo de perturbación es más corto que el tiempo de recuperación, por lo que el paisaje afectado se recupera.

Por otra parte, el parámetro **espacial** (S) tiene dos diferentes estados cualitativos:

- Las perturbaciones son relativamente más grandes que la extensión del paisaje,
- Las perturbaciones son relativamente más pequeñas que la extensión del paisaje.

La combinación bivariada con T, en las ordenadas, y S, en las abcisas, origina seis niveles que reflejan la dinámica espacio-temporal del régimen de perturbaciones en un paisaje determinado (Fig. 26): equilibrio o estado estable, estable con baja variación, estable con alta variación, estable con muy alta variación e inestable.



Turner, 2001

Figura 26.- Caracterización de la dinámica espacio-temporal del régimen de perturbaciones.

Los grados de modificación están asociados a la pérdida gradual o definitiva de los elementos del paisaje, al área relativa que cubren, según su estado de perturbación, el tiempo que duran los cambios y el incremento de los niveles de energía artificial (antrópica) introducidos al sistema. Los humedales costeros y los ecotonos palustres emergentes de zonas tropicales, son paisajes de baja energía pero con alta sensibilidad ambiental, por lo que es complejo medir todos los efectos sinérgicos que condicionan su estado de salud ecológica o equilibrio dinámico.

Para identificar y caracterizar los grados relativos de modificación ambiental en su contexto espacio-temporal, se utilizan los cambios en la cubierta vegetal como indicador dinámico de las transformaciones en el paisaje en un periodo de tiempo específico. Las modificaciones a la cubierta no sólo reflejan la pérdida o expansión de la vegetación sino los efectos ecológicos que éstos ocasionan. Las principales evidencias de cambios que reflejan las transformaciones de las condiciones morfológicas y funcionales originales del paisaje por perturbaciones antropogénicas son:

- Tendencia a reemplazar las fases clímax de sucesión vegetal por fases incipientes,
- Rejuvenecimiento de los niveles tróficos inferiores,
- Reducción o pérdida de la biodiversidad,
- Afectación a los mecanismos reguladores, propiciando que los desequilibrios se alcancen con mayor facilidad,
- Fragmentación o parcelización de hábitats,
- Sustitución de bordes o fronteras difusas o curvilíneas por rectilíneas o geométricas,
- Interrupción o pérdida de la conectividad,
- Interrupción o alteración de los ciclos biogeoquímicos,

- Reducción de la biomasa,
- Introducción de elementos alóctonos o exóticos al paisaje,
- Pérdida parcial o total de la porosidad vertical (incremento de superficies compactadas o impermeables).

La cubierta vegetal es resultado o síntesis de la condición ecológica del territorio y tiene una expresión morfológica susceptible de delimitarse objetivamente y cuantificable, según sus grados de perturbación. La identificación de los cambios, se basa en: el concepto de eco-unidades de Oldeman (1990), la sustitución gradual de elementos naturales por artificiales, el incremento de energía alóctona (antropogénica) por actividad económica, el período de tiempo de las modificaciones y el estado de resistencia-resiliencia que éstas ocasionan.

Oldeman (*op cit.*) define las eco-unidades como unidades de vegetación cuyo desarrollo inicia, al mismo tiempo, sobre una misma superficie y se pueden caracterizar en cuatro tipos: innovación, agradación, biostasis y degradación. En la fase de innovación se muestra un impacto reciente que destruyó parte del bosque y que está iniciando la regeneración de árboles, generalmente con muchas hierbas y bejucos. En la fase de agradación, la regeneración del bosque ha formado un dosel cerrado de árboles y/o arbustos. En la fase de biostasis, los árboles se organizan en el dosel uniforme, con copas en su máxima extensión, que ya no crecen en altura. Para la fase de degradación los árboles del dosel están degenerando, dejando pasar luz al suelo, acelerando el crecimiento de plántulas y estimulando con una elevada temperatura la germinación de semillas. Cada eco-unidad tiene una arquitectura arbórea y un funcionamiento eco-fisiológico cuyas fronteras se pueden identificar con claridad en cinco tipos: abrupta (crisp), muy abrupta (rather crisp), transicional (fuzzy), transicional extendida (very fuzzy) e indefinida (all border).

Sobre la base de los criterios de Oldeman (*op cit.*), Mateo y Ortiz (2001) y los propios incorporados en este trabajo, a continuación se describen los grados de modificación utilizados (Cuadro 10).

Cuadro 10.- Caracterización paisajística de los grados de modificación.

<i>Grado de modificación</i>	<i>Caracterización paisajística</i>
Bajo o nulo	Eco-unidades en biostasis de fronteras transicionales extendidas o continuas. El paisaje natural original no está alterado ni en su fisonomía ni en las relaciones funcionales que mantienen su equilibrio dinámico. Existe un alto valor ecológico y una actividad económica mínima, que provoca bajo impacto al medio natural. Las relaciones básicas de los paisajes naturales están poco alteradas por la explotación de recursos.
Moderado	Eco-unidades en agradación de fronteras transicionales o abruptas. Los paisajes naturales muestran una transformación significativa dispersa, no persistente de la cubierta vegetal, como consecuencia de las actividades agrícolas, ganaderas y forestales, así como de los asentamientos rurales y suburbanos. Aparece vegetación secundaria herbácea, arbustiva y arbórea, sin embargo, las alteraciones en los ciclos biogeoquímicos y los flujos y tipos de energía no son importantes.
Alto	Eco-unidades en innovación o degradación de fronteras abruptas o muy abruptas. Los paisajes muestran una transformación persistente y relictos de los elementos naturales originales (individuos o parches de vegetación original). Las relaciones funcionales se han modificado o adaptado con fines antrópicos específicos. Los insumos de materia y energía en gran medida son artificiales (agroquímicos, irrigación, mecanización, etc.) como resultado de una prolongada e inadecuada explotación agrícola y ganadera. Los asentamientos humanos son importantes modificadores del paisaje.
Muy alto	Ausencia de eco-unidades. Paisajes artificiales creados por el hombre sobre una base natural. El equilibrio dinámico original se ha roto por completo. Requieren para su funcionamiento grandes cantidades de materia y energía suministrada artificialmente. Han desaparecido todos o la mayoría de los elementos naturales de manera irreversible.
Sucesional incipiente	El paisaje tiende a establecer un nuevo estado de equilibrio ecológico a partir de perturbaciones antrópicas o naturales, reincorporando o reestableciendo algunos elementos del paisaje. Se presentan diversas etapas sucesionales (edades y estratos) de recolonización vegetal que no necesariamente restauran la condición original del paisaje. Diferentes estratos y etapas de innovación y agradación.

### III.2.1.2.-Materiales y métodos.

En función de los criterios generales antes expuestos, la metodología incluye una serie de procedimientos que llevan a la construcción de un índice de modificación de la cobertura por unidad del paisaje, partiendo del hecho de que los grados de modificación por actividades antropogénicas, se circunscriben en términos de diagnóstico ambiental, a los ámbitos funcionales de cada unidad. La combinación de cambios observados en diferentes intensidades por afectación antrópica y su cobertura espacio-temporal, da como resultado varios grados de modificación. Su reconocimiento se basa en los cambios sobre la cubierta vegetal primaria como referente inicial, sin embargo, al no existir cartografía, ni registros históricos de los paisajes primarios (aún existentes a principios del siglo XX), se utiliza la fuente cartográfica más antigua disponible.

Los procedimientos aplicados para identificar los grados de modificación por unidad del paisaje muestran el siguiente orden:

- Determinación de las unidades del paisaje jerárquicamente ordenadas (Capítulo II), según el nivel de levantamiento (1:50,000),
- Identificación de las actividades antrópicas que impactan la región y su relación con los grados de

modificación,

- Determinación de los criterios morfológicos del paisaje como claves para la identificación de los grados de modificación,
- Validación de los criterios y claves en un área piloto,
- Aplicación generalizada de los criterios, a través de clasificaciones digitales multitemporales de imágenes de satélite de alta resolución para toda el área de estudio,
- Generación del índice de modificación por unidad del paisaje, a partir de la comparación multitemporal de grados de modificación.

La identificación de las actividades antrópicas presentes en el área de estudio y su migración espacio-temporal, permite identificar sus grados de modificación y la permanencia o retroceso en la calidad ecológica del territorio, según las siguientes claves de identificación (Cuadro 11):

Cuadro 11.- Clave de cambios en la cubierta vegetal para tipificar los grados de modificación.

Grados de modificación	Migración o persistencia de las actividades antrópicas →	
	Fecha inicial de referencia	Fecha de último registro
Bajo	Vegetación original	Vegetación original
Moderado	Vegetación original	Selvas y pastizales secundarios en recuperación
Alto	Vegetación original	Agricultura y ganadería
	Selvas y pastizales secundarios en recuperación	Agricultura y ganadería
	Agricultura y ganadería	Agricultura y ganadería
Muy alto	Vegetación original o secundaria	Zonas suburbanas y urbanas
Sucesional incipiente	Todos las actividades excepto urbano	Vegetación en diferentes estados sucesionales de recuperación

Para la validación de las claves y grados de modificación sobre el área piloto, se utilizaron dos cortes de imágenes *Landsat* TM de dos fechas (1991 y 2001) sobre un ambiente típico fluvio-palustre representativo del área de estudio, como la cuenca baja del Río Palizada. Se aplicaron clasificaciones no supervisadas en clusters espectrales con el algoritmo *Isodata*, utilizando una variación de entre 5 y 40 clases, 20 interacciones, 15% de *threshold* y número mínimo de píxeles en una clase de 250. Este proceso crea conglomerados digitales similares a las firmas espectrales generadas por el algoritmo de mínima distancia. Se recodificaron 13 clases para dos fechas, la más antigua de 1991, y la más reciente del 2001. Posteriormente, se sobrepusieron los formatos raster de las dos fechas con asignaciones numéricas convencionalmente determinadas de las mismas, para detectar los cambios en un mapa final reclasificado de grados de modificación (Fig. 27).

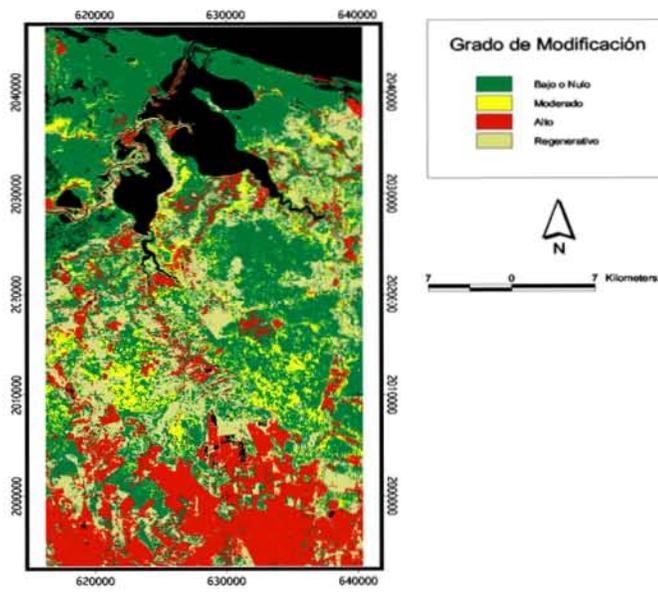


Figura 27.- Grid reclasificado del cruce de las clasificaciones parciales de la cobertura vegetal entre 1991 y 2001, en la zona centro-occidental de la Laguna de Términos, Camp.

Para corroborar en campo la consistencia de las claves de modificación, se diseñó un muestreo estratificado de 46 puntos representativos, donde se verificó la correspondencia entre en la descripción de los grados de modificación y su caracterización fisonómica por eco-unidades. Posteriormente, las claves y la detección de cambio se aplicó a toda el área de estudio para dos períodos entre tres fechas 1974, 1991 y 2001, validando su confiabilidad con registros cartográficos preexistentes, en paisajes palustres, fluvio-palustres, litorales y de perturbación agrícola, ganadera, suburbana y urbana. La selección de las fechas de las imágenes buscó, originalmente, la representatividad de los cambios en la cobertura vegetal durante tres décadas, escogiendo la más antigua disponible, la más reciente y una intermedia, sin embargo, la disponibilidad de sensores y el porcentaje de cobertura de nubes, impidió seleccionar una imagen intermedia para la década de los 80's, por lo que se decidió usar la mas cercan disponible. Igualmente para los cambios entre 1974 y 1991 se utilizaron dos tipos de sensores, Landsat MSS (*Multispectral Scanner*) y Landsat TM (*Thematic Mapper*), ambos con diferente resolución espacial y cobertura geográfica. Para solucionar la incompatibilidad de la resolución espacial entre imágenes, se remuestreó la imagen MSS, de 80 a 60 m y la TM de 28.5 a 30m mediante el algoritmo *Nearest neighbor*. Posteriormente, para reducir la dispersión de la información (efecto de sal y pimienta), se aplicó un filtro de paso bajo a las clasificaciones no supervisadas. Por otra parte el problema de la sobreposición incompleta entre las imágenes 1974 y 1991 se resolvió cortando (*clip*) la clasificación de 1991,

según los límites perimetrales de la imagen de 1974. Finalmente para compensar la dificultad en la interpretación de los datos entre fechas, según el número de hectáreas, y hacer compatibles las comparaciones, se calcularon los porcentajes de cobertura relativa por grado de modificación.

Finalmente, la correlación entre los grados de modificación de toda el área de estudio y el ámbito espacial de cada unidad del paisaje costero, se resume en un índice. Refleja los niveles de perturbación circunscritos a espacios de homogeneidad funcional relativa, en donde cada nivel de modificación tiene un peso relativo, según del porcentaje areal que ocupa con respecto al área total por unidad. Igualmente y con el fin de interpretar los cambios en la estructura original del paisaje, se realizó el cálculo de la fragmentación como indicador de la dinámica de los parches.

### **III.2.1.3.- Resultados.**

Los porcentajes relativos de cambios se basan en estadios evolutivos no lineales, por lo que dentro de la complejidad de las modificaciones y las fases evolutivas sucesionales, se presentaron imprecisiones debidas, sobre todo, al nivel de levantamiento y las fuentes de información disponibles.

Los resultados de la detección de cambio muestran (Cuadro 12) importantes porcentajes de modificación baja o nula (46.5%, entre 1974 y 1991, y 40%, entre 1991 y 2001) debido a que las áreas de manglar, selvas inundables, tulares y sabanas relictuales, se encuentran dentro de la zona núcleo del área protegida y a que intrínsecamente no tienen potencial productivo agrícola y ganadero (Fig. 28). El segundo porcentaje más alto, corresponde al de modificación alta debido a la persistencia de la actividad agrícola y ganadera, al menos durante los últimos veinte años, invadiendo las áreas de vegetación natural y secundaria en recuperación (acahuales de distintas edades y sabanas dispersas). El tercer porcentaje corresponde al nivel sucesional incipiente, que muestra una amplia gama de estadios sucesionales de selvas bajas y medianas subperennifolias secundarias, así como de terrenos agrícolas abandonados, en donde las eco-unidades de innovación evolucionan hacia fases de agradación de distintas edades y cubiertas.

Los ritmos de deforestación y explotación agropecuaria han sido modulados por las políticas nacionales y regionales. En el sureste se dio una modalidad de colonización-dotación ejidal, que adquirió un alcance significativo en términos forestales y agrícolas. Los primeros terrenos fueron dotados durante la década de los treinta y cuarenta, sobre todo en Campeche y en Quintana Roo. Por esa razón, no es casualidad que en tales entidades federativas se localicen la mayor parte de los ecosistemas forestales tropicales, que todavía

sobreviven (Galletti, 2002). Más aún, en el caso de Campeche las dotaciones y ampliaciones forestales de los ejidos se dieron a gran distancia de los centros de población ejidal, por lo que, en alguna medida, han permanecido sin desmontar, aunque hayan sido empobrecidos en sus especies más valiosas por la explotación selectiva.

Cuadro 12.- Modificaciones al paisaje en la Laguna de Términos, Camp., entre 1974 y 2001 identificadas mediante técnicas de detección de cambio con imágenes Landsat.

<i>Áreas de cambio</i>		
<i>Cambio 74-91</i>	<i>Hectáreas</i>	<i>%</i>
Bajo o nulo	317356.10	46.5
Moderado	33570.02	4.9
Alto	269563.38	39.5
Muy alto	2021.18	0.4
Sucesional incipiente	59533.84	8.7
<i>Total</i>	682044.52	100
<i>Cambio 91-01</i>	<i>Hectáreas</i>	<i>%</i>
Bajo o nulo	318763.15	40.9
Moderado	44088.63	5.7
Alto	249932.37	32.1
Muy alto	4299.64	0.7
Sucesional incipiente	161908.48	20.6
<i>Total</i>	778992.27	100

Aunque no pueda decirse que en Campeche se haya dado el reparto agrario en un escenario de orden territorial y de uso del suelo, al predominar la figura de ejido forestal, el reparto agrario no conllevó un patrón de asentamiento caótico ni agotó totalmente las reservas de terrenos nacionales (p.e. Calakmul). Más aún, ciertas áreas arboladas en los ejidos adquirieron un estatuto de mayor certidumbre, ya que fueron delimitadas como áreas forestales permanentes como requisito para recibir permisos de aprovechamiento. Estas son algunas de las razones, entre otras de carácter demográfico y cultural, por las cuales en Campeche las presiones hacia la deforestación no han alcanzado niveles tan extremos, como por ejemplo, en Chiapas y en gran parte de Oaxaca.

El primer intento, no muy exitoso, de colonización y poblamiento del Estado de Campeche se efectuó durante el período presidencial de Lázaro Cárdenas (1934-1940), y sus objetivos fueron: comunicar la región con el resto del país, a través de la construcción del ferrocarril del sureste, y dirigir nuevas estrategias para poblar las zonas fronterizas con Guatemala y Belice y las áreas vírgenes, mediante la expropiación de latifundios forestales. Posteriormente, en las zonas forestales casi despobladas de Campeche se implementó la política de colonización por parte del gobierno de Adolfo Ruiz Cortínez (1952-1958). Esta pretendía ubicar a los campesinos sin tierra, aumentar la producción agrícola y ganadera y promover la creación de nuevos centros de población

para evitar conflictos limítrofes con Guatemala. Al mismo tiempo, durante este gobierno se impulsó el programa de colonización llamado "La Candelaria", con el fin de poblar las márgenes del Río del mismo nombre, para lo cual desplazaron a 700 familias de campesinos de los Estados de Coahuila, Durango, Guanajuato, Jalisco, Michoacán y Zacatecas, así como de Tabasco y del municipio de Champotón (Galletti, 2002). Se desmontaron más de 700,000 hectáreas de bosque para entregarlas a 5,800 campesinos en un total de 66 ejidos, sin embargo, cerca de la mitad de estos inmigrantes pronto abandonaron la zona, debido a su desconocimiento del manejo de la tierra en ambientes tropicales y por carecer de servicios básicos.

Posteriormente, en el suroeste de Campeche se impulsó la política agrícola, de manera que hasta 1997, Campeche fue el tercer productor nacional de arroz con 67,753 ton, después de Veracruz y Sinaloa. Antes, en sus momentos más rentables, llegó a producir hasta 125,000 ton entre 1987 y 1988 (ASERCA, 1997), lo que significó grandes extensiones de terrenos inundables ocupados por arroz. Al abatirse gradualmente los rendimientos del arroz de temporal y perder competitividad nacional e internacional, los terrenos fueron abandonados y recolonizados por especies herbáceas y arbustivas, incorporándose a las cubiertas en sucesión incipiente.

Los porcentajes bajos de modificación muy alta, están asociados a las áreas urbanas y suburbanas en ambientes predominantemente rurales. Igualmente las áreas de modificación moderada se refieren a unidades del paisaje aisladas o dispersas de vegetación en recuperación, a partir de los elementos relictuales de la cubierta original. Esto supone procesos de innovación natural sobre desmontes recientes o antiguos (para el intervalo de tiempo considerado) no persistentes.

En cuanto a los ritmos temporales de modificación del territorio entre los períodos considerados (1974-1991 y 1991-2001), se observan las mismas oscilaciones pero con distintas intensidades debido, entre otras razones, a lo relativamente corto del tiempo considerado en el análisis. Del 100% de la superficie considerada, los mayores valores de modificación se encuentran en los niveles bajo y alto para los dos períodos, sin embargo, es más representativa en intensidad la modificación entre 1974 y 1991 por lo antes expuesto.

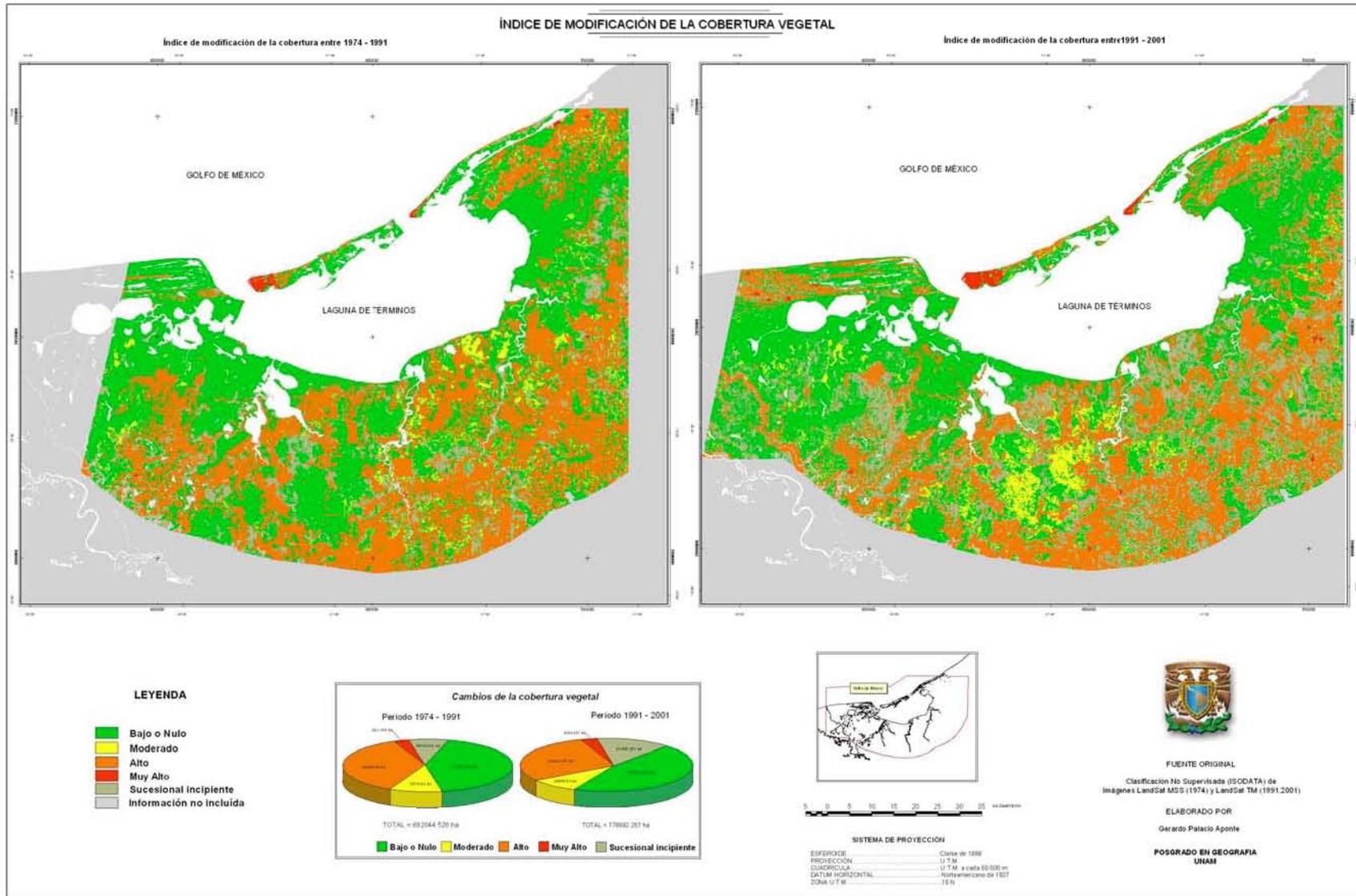


Figura 28.- Índice de modificación de la cubierta vegetal para la Laguna de Términos, Camp., en dos periodos 1974-1991 y 1991-2000.

### III.2.1.3.1.- Índice de modificación de la cubierta vegetal.

El índice de modificación de la cubierta propuesto en este trabajo, refleja el valor ponderado por áreas relativas para cada grado de modificación, con respecto al total del área de la unidad del paisaje. Es decir, reajusta el tamaño del disturbio y su significancia, bajo condiciones de funcionamiento espacialmente homogéneo, para períodos de tiempo específicos. Permite ubicar las presiones más significativas y, por consiguiente, optimizar el análisis de las amenazas que afectan la integridad ecológica de cada unidad del paisaje. Mide factores ecológicos clave, como la extensión territorial del disturbio y su proporción relativa con respecto al entorno ambiental del conjunto de las unidades del paisaje. Señala el estado de condición de cada unidad del paisaje, en función del conjunto de los parches por clase de modificación.

El índice se aplica para la interfase continental del paisaje costero, debido a la facilidad para darle seguimiento a los cambios visibles en el paisaje. Se basa en la parcelización o fragmentación del paisaje y la importancia relativa de los grados de modificación y su transformación en el tiempo, variables a las que sólo se les puede dar seguimiento en ambientes terrestres.

Antes de calcular el índice, se extraen de los mapas de detección de cambios por períodos (1974-1991 y 1991-2001) las áreas específicas que cubre cada unidad del paisaje, mediante una cobertura vectorial. De éstas se obtienen los datos de la métrica y fragmentación del paisaje mediante el programa *Fragstats* para *Arcview 3.X* (Fig. 29).

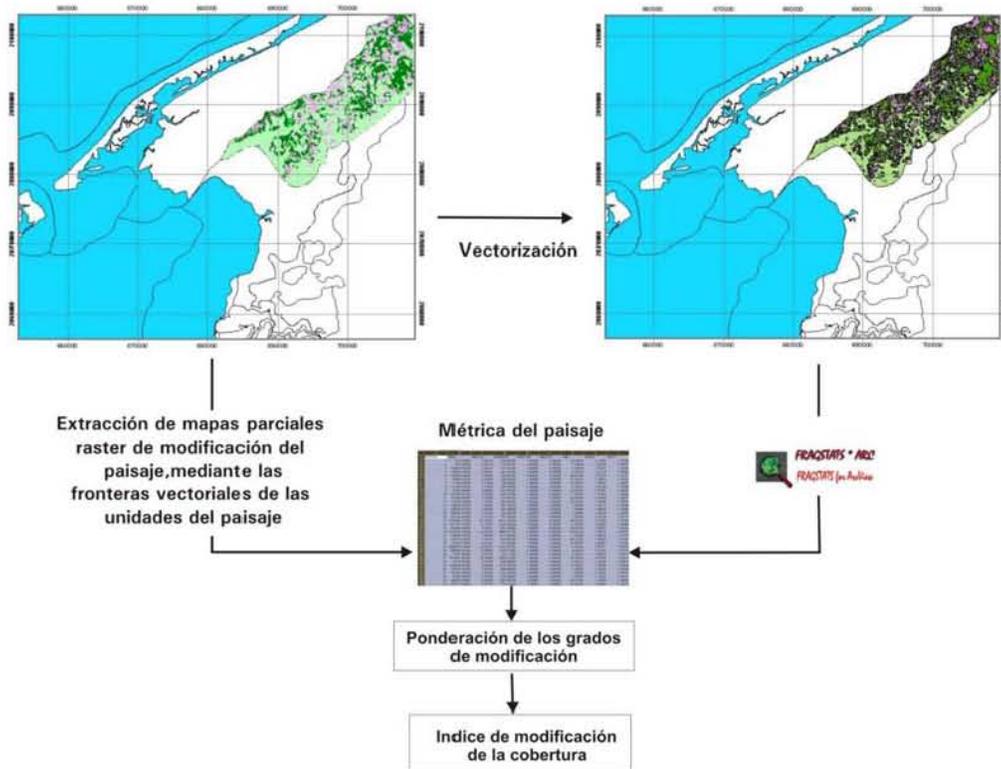


Figura 29.- Etapas en la determinación del índice de modificación de la cubierta vegetal por unidades del paisaje.

Se calculan las áreas relativas de modificación por clase y unidad del paisaje, número de parches asociados, índice de fragmentación por clase, representatividad porcentual pesada, porcentaje de cobertura areal por clase, tamaño medio del parche por clase y el índice de modificación. En el cuadro 13, se muestra un ejemplo del primer cálculo general de la métrica del paisaje, entre 1974 y 2001, para toda el área de estudio. Posteriormente, este mismo análisis se aplica entre los períodos históricos considerados y para unidades del paisaje.

Cuadro 13.- Información tabular de fragmentación del paisaje entre la fecha más antigua disponible (1974) y la más reciente (2001), para la Laguna de Términos, Camp.

<b>Grado de Modificación</b>	<b>CA</b>	<b>NP</b>	<b>IF10</b>	<b>RPC</b>	<b>PERCLAND</b>	<b>MPS</b>	<b>IM</b>
1 Bajo	72015.12	4101	4.01	2.68	29.34	17.56038	1440.30
2 Moderado	15023.64	2829	2.76	1.40	6.12	5.31058	751.18
3 Alto	126549.16	1120	1.09	94.07	51.56	112.99033	50619.67
4 Muy Alto	89.53	6	0.01	0.08	0.04	14.92143	44.76
5 Sucesional incipiente	31773.71	2181	2.13	1.77	12.95	14.56841	953.21
Total	245451.17	10237	10.00	100.00	100.01	165.35113	53809.13
Índice de modificación							<b>0.21923</b>

<b>CA</b>	Área por clase en hectáreas
<b>NP</b>	Número de Parches
<b>IF10</b>	Índice de fragmentación = $NP/Total\ de\ parches * 10$
<b>RPC</b>	Representatividad porcentual pesada
<b>PERCLAND</b>	Porcentaje de la clase de modificación para el área de estudio
<b>MPS</b>	Tamaño medio de los parches en hectáreas = $CA/NP$
<b>IM</b>	Índice de modificación = $CA * valor\ de\ importancia\ relativa\ por\ grado\ de\ modificación$

Para obtener el índice de modificación, propuesto por el autor de este trabajo, se utiliza la siguiente fórmula sobre la base de datos obtenida para cada unidad del paisaje y para el período de tiempo considerado:

$$IM = \frac{\sum CA_1(w_1) + CA_2(w_2) + CA_3(w_3) + CA_4(w_4) + CA_5(w_5)}{\sum CA_{1,2,3,4,5}}$$

En donde:

<b>IM</b>	Índice de modificación
<b>CA<sub>x</sub></b>	Área por clase en hectáreas
Peso de importancia relativa por grado de modificación	
<b>w<sub>1</sub></b>	0.02 Bajo
<b>w<sub>2</sub></b>	0.05 Moderado
<b>w<sub>3</sub></b>	0.4 Alto
<b>w<sub>4</sub></b>	0.5 Muy alto
<b>w<sub>5</sub></b>	0.03 Sucesional incipiente
<b>CA<sub>1,2,3,4,5</sub></b>	Área de la unidad del paisaje

La ponderación de la importancia relativa de los grados de modificación dentro del índice, busca igualar la unidad como valor máximo, para al final no minimizar la importancia de las modificaciones altas y muy altas (generalmente de áreas reducidas), ni magnificar las áreas con modificaciones bajas o nulas. De tal forma, que el índice muestre una relación equilibrada entre área e importancia de la modificación clasificada en cuatro niveles: Bajo (0-0.25), Medio (0.26-0.50), Alto (0.51-0.75) y Muy alto (0.76-1.0).

En el ámbito funcional de cada unidad del paisaje, se presentan, para los dos períodos históricos considerados, niveles medios y bajos de modificación (Cuadro 14). Esto debido a las limitaciones intrínsecas de los humedales costeros para las actividades productivas primarias y al estatus de protección ecológica en el área protegida de Laguna de Términos, desde 1994. Sólo en la geofacie de isla barrera, se presentan modificaciones altas por el crecimiento urbano y suburbano de ciudad del Carmen, Sabancuy e Isla Aguada.

Cuadro 14.- Índice de modificación por unidades del paisaje y período histórico en la Laguna de Términos, Camp.

<b>Geosistemas y geofacias de la interfase continental</b>					
<b>Geosistemas</b>	<b>Geofacias</b>	<b>Índice de modificación</b>			
		<b>1974-1991</b>	<b>Grado</b>	<b>1991-2001</b>	<b>Grado</b>
I.- Litoral	1.- Cordones litorales	0.14	Bajo	0.20	Bajo
	2.- Isla barrera	0.51	Alto	0.26	Medio
II.-Palustre	1.-Intermareal de régimen ordinario	0.04	Bajo	0.04	Bajo
	2.-Intermareal de régimen extraordinario	0.16	Bajo	0.12	Bajo
	3.-Supramareal	0.26	Medio	0.19	Bajo
	4.-Emergente	0.11	Bajo	0.11	Bajo
III.- Kárstico-palustre		0.16	Bajo	0.12	Bajo
IV- Fluvio-lacustre	1.- Cautivo	0.17	Bajo	0.10	Bajo
	2.- Semicautivo	0.28	Medio	0.21	Medio
	3.- Activo	0.30	Medio	0.19	Bajo
V.- Fluvio lacustre- estuarino		0.15	Bajo	0.13	Bajo
VI.- Fluvial		0.21	Medio	0.21	Medio
VII- Deposicional proluvio-aluvial		0.22	Medio	0.20	Bajo
VIII.- Automórfico		0.29	Medio	0.21	Medio

Algunas unidades como la geofacie intermareal de régimen ordinario, no presenta cambios (0.04), e incluso localmente, las áreas de manglar rojo y negro han ganado espacios costeros durante las últimas dos décadas.

### III.2.2.-DETECCIÓN DE CAMBIOS EN LA MORFOLOGÍA LITORAL.

En las zonas costeras bajas acumulativas del Golfo de México, los cambios eco-geográficos sobre la franja litoral son sumamente dinámicos, debido a la naturaleza geológicamente reciente de los depósitos fluvio-deltaicos y a la plataforma continental extendida de pendientes bajas sobre la que se alojan. El depósito de los materiales clásticos continentales aportados hacia la llanura costera, desde el Terciario, ha dado lugar a la acreción de amplios sistemas deltaicos, situados en una costa que, genética y morfológicamente, es de tipo primario, y tectónicamente, puede ser considerada como de mares marginales (Carranza *et al.*, 1975). Este sistema, típicamente costero, es el remanente de un cuerpo lagunar más extenso, segmentado y rellenado por procesos de sedimentación terrígena y por la acreción de barreras orgánicas. El sistema está formado por dos series de antiguos cordones de playa acrecentados a partir de la estabilización del mar en su actual nivel, hace unos 2,000-2,500 años (Thom, 1967; Phleger y Ayala-Castañares, 1971).

En este sistema costero se pueden observar cambios súbitos para fechas o fenómenos extraordinarios específicos (tormentas), o bien cambios graduales a lo largo de amplios períodos de tiempo. El geoindicador utilizado en este trabajo para la detección de cambios en la morfología litoral, se enfoca a los últimos, en donde los cambios en la conformación de la línea de costa se consideran indicadores del funcionamiento vigente en el sistema costero. La detección de cambios y tendencias permite caracterizar la geodinámica costera predominante, sin embargo, la causa de esos cambios requiere de estudios precisos del balance sedimentario, los procesos costeros, los eventos meteorológicos extraordinarios y la afectación humana al ambiente, entre otros.

Tradicionalmente la detección de cambios morfológicos costeros se ha realizado mediante la digitalización detallada de líneas de costa de diferentes fechas en fotografías aéreas a escala grande (> 1:50,000). Para ambientes deposicionales fluviomarinos similares a Campeche, Williams *et al.* (1991) realizaron un monitoreo sistemático en Louisiana, EUA, desde 1955, obteniendo mapas de erosión y acreción anuales y de cambio promedio entre 1955 y 1978. Por otra parte, Dunbar *et al.* (1992) evaluaron la pérdida de tierras costeras en los ambientes deposicionales deltaicos de Louisiana. Estos procedimientos son precisos y útiles, sobre todo en fechas anteriores a 1970, años en los cuales la información de imágenes de satélite no se encontraba disponible. Sin embargo, estas ventajas comparativas tienen algunos inconvenientes asociados a la adquisición y homogenización de la información disponible en México, condiciones que han sido parcialmente

resueltas por las imágenes de satélite de alta resolución, al tener la posibilidad de manejarlas digitalmente, con mayores resoluciones espectrales y, por lo tanto, con mejores posibilidades para interpretar la información.

### III.2.2.1. – Materiales y métodos.

Para detectar los cambios geomorfológicos en la conformación de la línea de costa del área de estudio, se aplica el análisis multitemporal de imágenes de satélite Landsat Multispectral Scanner (MSS) representativas de 1970, 1980 y 1990 (Instituto de Geografía, UNAM), a través de una composición en color. A cada color de la composición (cañón), se le asigna una banda del infrarrojo cercano (entre  $0.8\mu\text{m}$  -  $1.1\mu\text{m}$ ) con distinta fecha. Así, mediante el uso de reglas básicas de la teoría del color, se obtienen distintas combinaciones, mismas que tienen distintos significados geomorfológicos (Palacio, 2001).

Dependiendo de la banda y fecha asignada a cada cañón, se obtienen diferentes colores con significados geomorfológicos específicos como: ganancia de tierras por acreción, pérdida de terrenos por erosión y terrenos estables o compensados entre los períodos de tiempo establecidos, a partir de las fechas de las imágenes originales. Con base en lo anterior, se elaboró un cuadro de correlaciones (Cuadro 15), a partir del cual se obtienen ocho posibles combinaciones para tres fechas y tres colores primarios, según el método original de Lewis, *et al.* (1996). La identificación de 6 colores principales está destinada a detectar zonas litorales con reflectancias extremas (niveles digitales altos o bajos) de alto contraste, por lo que todos los tonos intermedios en zonas no litorales están fuera del alcance y objetivo del método.

Cuadro 15.- Relaciones de color asociadas a la pérdida o ganancia de tierras litorales en un compuesto de falso color infrarrojo multifecha.

	<i>Azul t1</i>	<i>Verde t2</i>	<i>Rojo t3</i>	<i>Resultado de la combinación de colores</i>	<i>Cambios litorales interpretables</i>
Agua	N	N	N	Negro	Acromático
Tierra	B	B	B	Blanco	Acromático
A1/A2/T3	N	N	B	Rojo	Tierras Ganadas (t2 + t3)
A1/T2/T3	N	B	B	Amarillo	Tierras Ganadas (t1 + t2)
A1/T2/A3	N	B	N	Verde	Tierras Ganadas (t1 + t2); Tierras Perdidas (t2 + t3)
T1/A2/A3	B	N	N	Azul	Tierras Perdidas (t1 + t2)
T1/A2/T3	B	N	B	Magenta	Tierras Perdidas (t1 + t2); Tierras Ganadas (t2 + t3)
T1/T2/A3	B	B	N	Cyan	Tierras Perdidas (t2 + t3)

A: Agua T: Tierra

B: Blanco (valores de reflectancia altos)

N: Negro (valores de reflectancia bajos)

t1, ..., 3: tiempo (fecha)

Para la sobreposición de imágenes, se parte del hecho de que los cortes de las tres fechas corresponden píxel a píxel, dentro de un rango tolerable de error (+/- 15 m), verificado por la localización de los

puntos de control cartográfico, de fotografías aéreas (escala 1:75,000) y de campo con GPS. Los cambios morfológicos erosivos o acumulativos significativos corresponden a resoluciones espaciales mayores a 60 m lineales o 3600 m<sup>2</sup> areales.

Una vez identificadas las clases digitalmente, se realizó una clasificación supervisada utilizando el algoritmo de máxima similitud (*maximum likelihood*), debido a que éste ajusta la clasificación digital a los niveles digitales originales. En porcentaje, se alcanzó una eficiencia en la clasificación del 89.0%, debido a variaciones en la reflectancia de los suelos con alto contenido de materia orgánica en la interfase continental y a medios acuáticos con alta turbidez inorgánica. Ambas situaciones y algunos matices cromáticos de transición contribuyeron a la confusión en la identificación de algunos cambios.

### III.2.2.2.- Resultados.

A partir de las combinaciones de falso color infrarrojo multifecha, se detectaron para el área de estudio, tres situaciones en la geodinámica litoral (Cuadro 17 y Figura 30): Tierras ganadas entre 1980 y 1990; Tierras ganadas entre 1970 y 1980 y Tierras perdidas entre 1970 y 1980.

Cuadro 17.- Cambios geomorfológicos identificados en el compuesto de falso color infrarrojo multitemporal (1970-1980-1990) en la Laguna de Términos, Camp.

	<i>Azul</i> <i>t1</i> <i>(1970)</i>	<i>Verde</i> <i>t2</i> <i>(1980)</i>	<i>Rojo</i> <i>t3</i> <i>(1990)</i>	<b><i>Cambios geomorfológicos</i></b>	<b><i>Color</i></b>
<b>A1/A2/T3</b>	N	N	B	Tierras ganadas (t2+t3)	Rojo
<b>A1/T2/T3</b>	N	B	B	Tierras ganadas (t1+t2)	Amarillo
<b>T1/A2/A3</b>	B	N	N	Tierras perdidas (t1+t2)	Azul

A: Agua T: Tierra

B: Blanco (valores de reflectancia altos)

N: Negro (valores de reflectancia bajos)

t1,...,3: tiempo (fecha)

Las tierras ganadas muestran tendencias acumulativas durante las dos décadas, sin presencia de fases erosivas y las tierras perdidas inician su etapa de erosión entre 1970 y 1980, manteniendo su tendencia durante la última década.

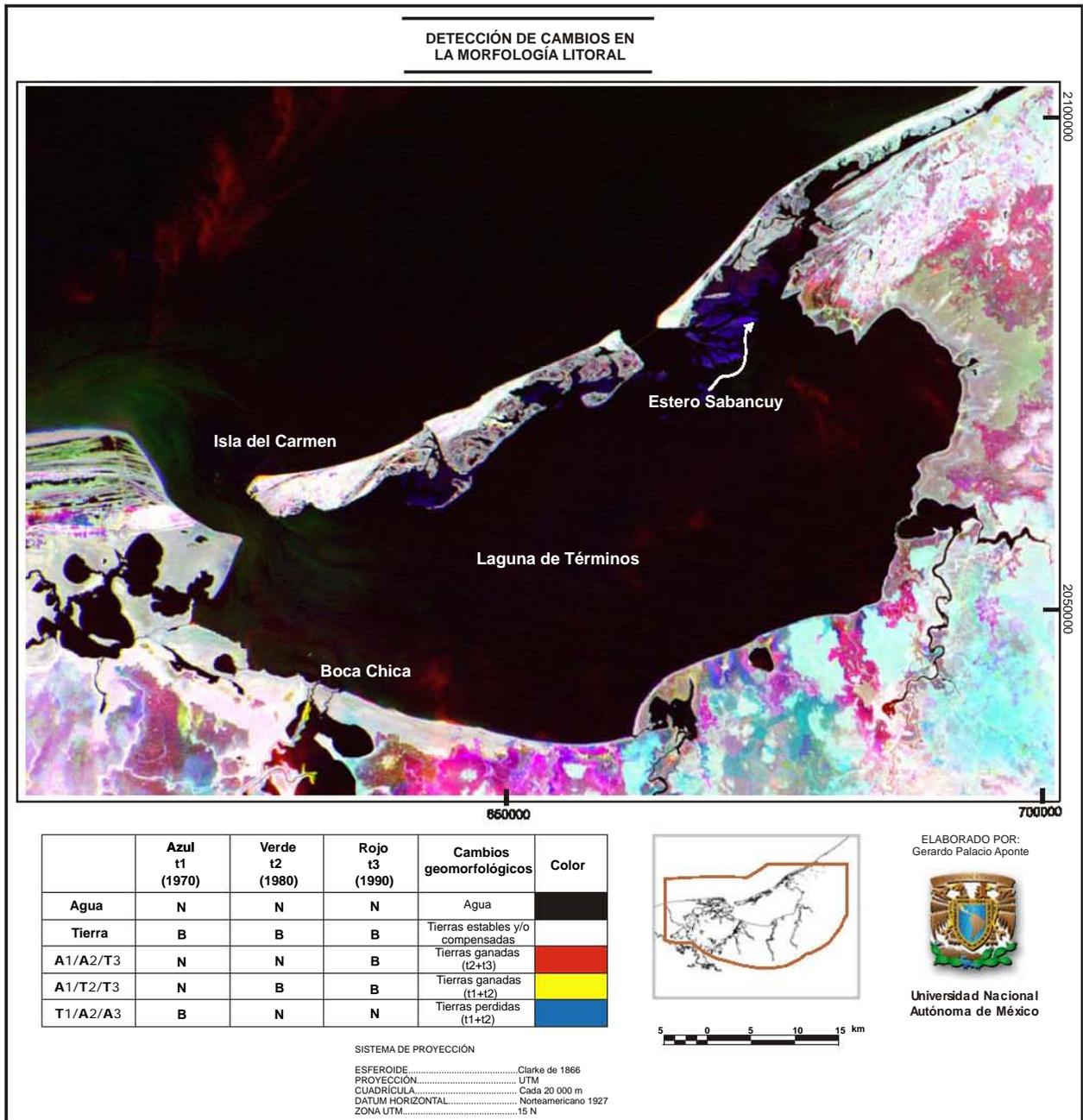


Figura 30.- Falso color infrarrojo cercano (1980, 1990 y 2001) y cambios en la morfología litoral de la Laguna de Términos, Camp.

Dentro de la geodinámica costera del litoral de la zona de estudio se detectaron tres zonas de cambios significativos en 30 años para las unidades del paisaje en la Laguna de Términos. Según su ubicación geográfica, Boca Chica-Palizada, Isla del Carmen-Zacatal y Estero Sabancuy-Isla Aguada (Cuadro 18).

Cuadro 18.- Pérdida y/o ganancia de tierras costeras en Laguna de Términos, Camp.

<b>Cambio geomorfológico interpretado</b>	<b>km<sup>2</sup></b>	<b>Ubicación</b>
<b>Azul</b> En las dos décadas se pierden tierras	1.598	Zacatal mar
	1.966	Zacatal entrada boca
	1.145	Zacatal entrada media hacia la Laguna de Términos
	0.165	Zacatal entrada interna hacia la Laguna de Términos
	1.044	Boca del Río Palizada
<b>Total</b>	<b>5.918</b>	
<b>Amarillo</b> En las dos décadas se ganan tierras	0.885	Laguna interna Río Palizada
	0.550	Playa Norte (Isla del Carmen)
	0.334	Isla Aguada
	0.309	Delta interior Laguna del Vapor (Palizada)
	0.191	Delta interior Laguna del Vapor (Palizada)
<b>Total</b>	<b>2.344</b>	
<b>Rojo</b> En la última década se ganan tierras	0.493	Isla Aguada
	0.173	Playa Norte (Isla del Carmen) mar
	0.036	Playa Norte (Isla del Carmen) boca
<b>Total</b>	<b>0.702</b>	

En Boca Chica-Palizada (Fig.31) dentro del geosistema intermareal de régimen ordinario, se observan procesos acumulativos asociados (color amarillo) a los distributarios del sistema deltaico del Río Palizada y a la colonización vegetal de pastizales y juncos bajos. Igualmente es notoria una dinámica progradante hacia la margen sureste del vaso lagunar durante la última década, debido a la colonización en sucesión incipiente de mangle negro.

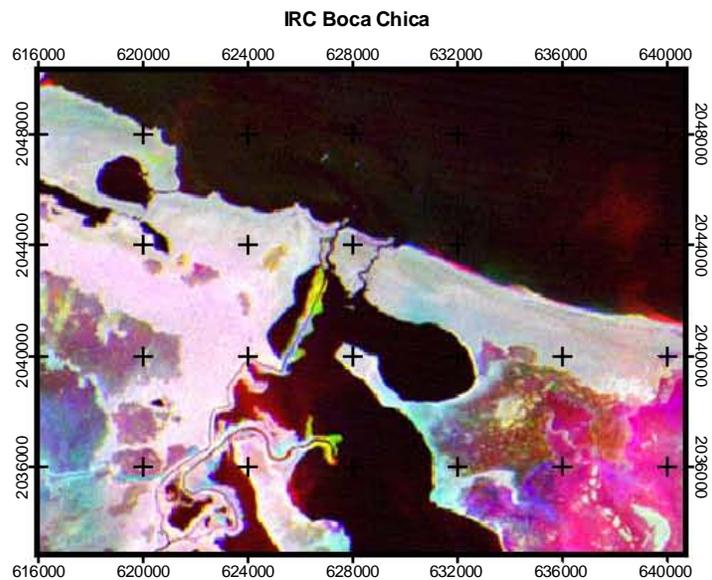


Figura 31.- Boca Chica-Palizada en la zona sur-occidental de la Laguna de Términos, Camp.

Por resultados apreciables en el compuesto de falso color, hubo también una ligera tendencia a la pérdida de tierras litorales en el primer período (70´s-80´s) hacia la desembocadura del Río Palizada y margen sur del vaso lagunar. Debido a la poca extensión areal del cambio, se infiere un resultado amplificado por la marea diurna.

En Isla del Carmen-Zacatal (Fig. 32), que forma parte del geosistema litoral, se observan los contrastes más extremos entre los patrones de acumulación y erosión. En punta Zacatal, existe una pérdida persistente de tierras litorales durante las últimas dos décadas (70´s-80´s). La mayoría de las pérdidas, se relacionan indirectamente con actividades humanas (Sasser *et al.* 1986; Louisiana Wetland Protection Panel, 1987; Turner and Cahoon, 1988) como el control de cuencas y avenidas, la extracción de petróleo y agua y la construcción de canales y terraplenes. Estas actividades no destruyen directamente las tierras costeras, sin embargo, amplifican la fuerza de las mareas en sistemas identificados históricamente como de baja energía, alteran el balance entre la subsidencia y la acreción, reducen el aporte de nutrientes y sedimentos, abaten la retención de agua dulce e incrementan los niveles de sal, sulfatos y otras sustancias potencialmente tóxicas para las especies vegetales nativas (Good, 1993). En línea perpendicular sobre el sector de la costa afectada se han perdido más de 100 m en tres décadas, lo que significa una pérdida promedio de más de 30 m por década.

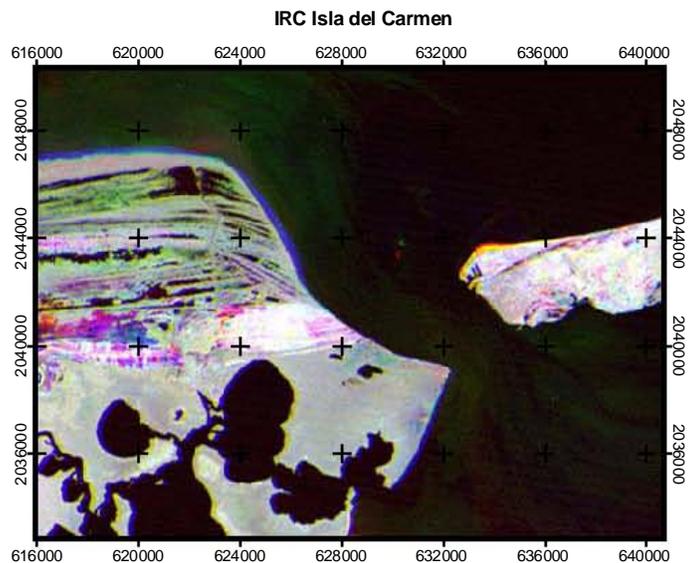


Figura 32.- Boca del Carmen-Zacatal en la zona occidental de la Laguna de Términos, Camp.

Por el contrario, en Isla del Carmen los procesos agradativos de arenas y fragmentos conchíferos son constantes en la punta Playa Norte (color amarillo y rojo), donde el terreno ganado al mar llega a los 350 m en línea perpendicular. La tendencia acumulativa de las descargas por deriva litoral se ha mantenido durante las últimas décadas.

En el estero Sabancuy (Fig. 33) la geodinámica es progradante acumulativa por deriva litoral. Forma parte de la geofacia de isla barrera de naturaleza geomorfológicamente inestable. Los bajos inundables se anexan a manera de apéndices, apenas anclados al sistema de barras dispuestas a manera de flechas litorales. Por otra parte, hacia el interior del estero y en la boca de Puerto Real, las tierras en azul corresponden más bien a una pérdida temporal de tierra emergida, debido a que la pleamar coincidió para la última fecha de la imagen.

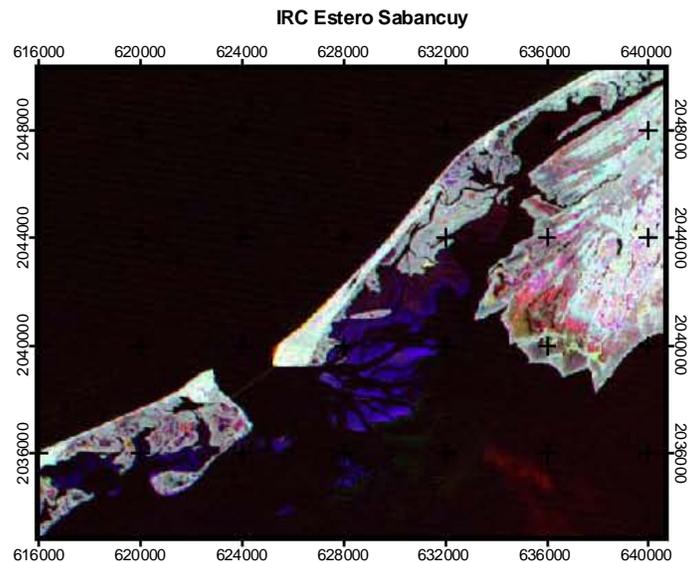


Figura 33.- Estero Sabancuy la zona nor-oriental de la Laguna de Términos, Camp.

Del balance entre litorales agradativos y degradativos, la pérdida de tierras resultó mayor con 5.9 km<sup>2</sup> contra 3.1 km<sup>2</sup> de acumulación. Aunque la geodinámica costera muestra predominantemente patrones de acumulación litoral, también es evidente la inestabilidad propia de las geofomas costeras acumulativas recientes. Igualmente y como causa adicional de la pérdida de tierras, se presentan evidencia indirectas de subsidencia o hundimiento progresivo y diferencial, asociado al proceso de depositación y compactación de sedimentos, tanto terrígenos como carbonatados.

### **III.2.3.- SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO ANTE LA OCURRENCIA DE HURACANES.**

En un período de 140 años, 21 huracanes han reconocido en su trayectoria el Estado de Campeche (NOAA, 2003). Aunque para las frecuencias regionales son pocas las repeticiones y bajas las intensidades, cuando ocurren, ocasionan cambios y daños extraordinarios, tanto en la estructura y el funcionamiento de los paisajes naturales costeros, como en la infraestructura. Se registran cambios tan notorios en la morfología costera (erosión y acreciones extraordinarias) que después de la ocurrencia de un fenómeno de alta intensidad, la línea de costa se puede encontrar totalmente transformada.

La situación excepcional de amenaza originada por huracanes de alta intensidad requiere del diseño de metodologías para evaluar espacialmente el conjunto de las condiciones naturales, que inhiben o magnifican cambios y efectos adversos en los paisajes naturales y antrópicos. Conocer su comportamiento y efectos destructivos, a partir de la referencia de fenómenos similares ocurridos en el pasado, permite establecer los probables escenarios de cambios o daños extremos que pudieran ocurrir en el futuro.

El huracán más significativo, en términos de modificación a la zona costera de Campeche, ha sido el Roxana, que por momentos alcanzó la categoría tres en la escala Saffir/Simpson (vientos entre 178 y 209 km/h). El 10 de octubre de 1995 se convierte en huracán, a 200 millas al Este de la Península de Yucatán y después de afectar la península, se mantuvo estacionado nueve días frente a la costa de Campeche. Esta situación totalmente anómala, ocasionó oleaje extraordinario constante y precipitaciones acumuladas de casi 200 mm en cinco días, cantidad que representa el 20% de la precipitación total anual promedio registrada en la región.

Dentro de este marco general y precisando la perspectiva territorial del problema, se parte del concepto de "peligrosidad del lugar", utilizado a partir de la década de los 50's (Calvo, 1984) para explicar cómo las amenazas naturales, concebidas como peligros latentes y/o potenciales asociados con fenómenos físicos de origen natural, tienen una manifestación en un espacio específico y en un tiempo determinado. A su vez, dentro de este concepto se incluye la susceptibilidad del terreno o conjunto de respuestas de los elementos del paisaje natural ante la ocurrencia de un fenómeno perturbador. Este último adquiere una dimensión fundamental, en términos exploratorio-preventivos, de mitigación de daños y de planificación del territorio, porque permite delimitar, a nivel local, los peligros reales y potenciales, diferenciando unidades del terreno, que por su naturaleza intrínseca, favorecen o inhiben los efectos destructivos de un fenómeno dado.

En México, el estudio de la expresión territorial de las amenazas hidrometeorológicas según su peligrosidad es incipiente. Esta situación provoca vulnerabilidad en términos tecnológicos, económicos y organizativos. No existe aun una estrategia dentro de la planificación del territorio, que permita prever o amortiguar los efectos destructivos de las amenazas naturales. La mayoría de las poblaciones y las actividades económicas asociadas, presentan un crecimiento desordenado sobre un entorno natural que no ha sido evaluado en términos de amenaza para la vida humana y la infraestructura. No existe la cultura formal de la prevención, ni el uso de la zonificación de riesgos naturales como instrumento para optimizar la ubicación de los asentamientos humanos.

Por lo anterior, en este trabajo se destaca la importancia del estudio de la susceptibilidad del terreno costero por huracanes dentro de su contexto paisajístico. Se evalúa la respuesta (resistencia, grado de exposición, debilidad, etc.) de los elementos naturales del paisaje y de las características físico-geográficas que favorecen o inhiben los efectos destructivos de los huracanes en tierra. En este primer acercamiento a la forma de construir el posible escenario de susceptibilidad del terreno, se ponderan los efectos destructivos como variables, a partir de un modelo conceptual, con operaciones espaciales en un SIG para representar espacialmente la intensidad de los efectos destructivos potenciales de los huracanes, según las formas en que el territorio los asimila (susceptibilidad del terreno).

La evaluación y zonificación de la susceptibilidad del terreno ante la ocurrencia de huracanes se basa en un modelo conceptual elaborado a partir de la selección de variables significativas asociadas a la respuesta del ambiente costero ante la ocurrencia de huracanes. Pretende resolver el *cómo y dónde* se presentará un huracán, es decir, los posibles escenarios (zonificación) de la susceptibilidad. Estos cuestionamientos se resuelven a través del estudio de la génesis y comportamiento del fenómeno (fenomenología) y la susceptibilidad del terreno o conjunto de respuestas de los elementos naturales del paisaje ante la ocurrencia del mismo.

### **III.2.3.1.- Materiales y métodos.**

En el contexto de lo antes expuesto la metodología (Fig.34) tiene como etapa inicial, la recopilación de datos espaciales pre y post huracanes, sistematizados según los criterios y variables significativas establecidas en un modelo conceptual. Incluye cartografía, imágenes de satélite de alta resolución, registros iconográficos georeferenciados de efectos destructivos en la zona costera, registro sistemático de daños a los

ecosistemas reportados en bibliografía y registro histórico-meteorológicos de los huracanes de mayor intensidad a nivel regional (Gilberto, Opal y Roxana, entre otros). En el siguiente flujograma se muestran las etapas de la metodología.

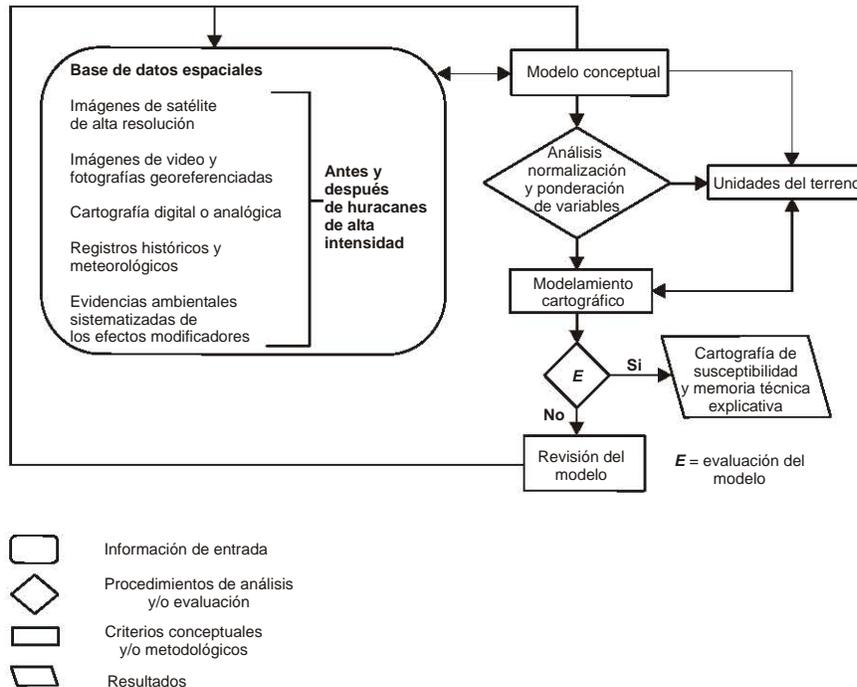


Figura 34.- Flujograma de la metodología para evaluar la susceptibilidad del terreno ante la ocurrencia de huracanes.

Igualmente, dentro de la recopilación de datos espaciales, la interpretación de mosaicos digitales de imágenes aéreas de video (Fig. 35) y las observaciones en campo para fenómenos clave (huracán Roxana en Campeche) de referencia, permiten tipificar comportamientos, elegir variables y conocer la cobertura de sus efectos destructivos. Las imágenes digitales de video son tecnológicamente y económicamente viables y se pueden obtener de vuelos post huracán, mediante una videogradora o cámara digital convencionales y un GPS. En la figura 35 se observa, por ejemplo, el efecto de *overwash* o sobredimentación acelerada (hasta 1.80 m de espesor) tierra adentro, generado por el oleaje de tormenta del huracán Roxana.



Figura 35.- Mosaico de videografía mostrando el efecto de *overwash* entre Sabancuy e Isla Aguada, Camp.

Las variables y su análisis tienen como marco de referencia espacial las unidades del terreno (*land units*), debido a que para evaluar la susceptibilidad del terreno, se utiliza por definición la unidad mapeable homogénea, concebida como una porción del territorio con un conjunto de condiciones comunes que se diferencian de las unidades adyacentes mediante fronteras definidas (Hansen, 1984). Las unidades del terreno son la expresión conceptual unitaria y simple de las unidades paisaje.

Para explicar la relación entre variables y unidades del terreno se utiliza el enfoque heurístico, basado en el conocimiento a priori de las causas que predisponen al terreno a ser afectado por un fenómeno. Las variables se seleccionan bajo la óptica del análisis condicional basado en el Teorema de Bayes (Morgan, 1968), en donde la probabilidad de las causas se determina a partir de los efectos observados en el pasado. El teorema se basa en la siguiente ecuación:

$$P(E/O) = P(E) \{P(O/E) / P(O)\} \text{ donde:}$$

P (E/O) Fenómeno o evento observado

P (E) Probabilidad anterior del evento

P (O/E) Probabilidad condicional que O está asociado con E

P (O) Probabilidad del evento observado

Todos los supuestos sobre el comportamiento y efectos de los fenómenos futuros, se basan en el conjunto de condiciones y comportamientos conocidos presentes y pasados. Por otra parte, los efectos modificadores de los huracanes tienen una dimensión temporal particular. Ocurren en períodos de tiempo cortos (días), que pueden tener repeticiones intranuales, anuales, o indeterminadas, si se habla de huracanes de magnitud específica. A diferencia de otros fenómenos que ocasionan cambios graduales, evolutivos o incluso predecibles, los huracanes pueden ocasionar cambios súbitos, que modifican significativamente la estructura, el

equilibrio y el funcionamiento de los paisajes costeros, incluso de forma irreversible. El estudio de los tiempos de recurrencia del fenómeno tiene dos enfoques: el que relaciona la periodicidad y peligrosidad del fenómeno, según las frecuencias regionales, y el que considera la ocurrencia e impacto de eventos de alta intensidad para áreas específicas.

Debido a que las trayectorias e intensidades de los eventos no tienen un patrón repetible ni una duración predecible, es conveniente obtener periodicidades comparables a nivel regional, generando mapas de las condiciones promedio de alturas de oleaje, vientos ciclostróficos y presiones mínimas para todos los huracanes que han afectado una región. Esto permite tipificar el nivel de actividad promedio de fenómenos por región para entonces compararla con otras, identificando las magnitudes e intensidades en un contexto global. En cuanto a las frecuencias regionales, la vertiente del Atlántico-Mar Caribe y, en particular, la Península de Yucatán, ha sufrido el embate de 91 huracanes, de diversas intensidades, entre los años de 1949 y 2002 (actualizado de Díaz-Hernández, 2001). El cuadro 19 muestra el nombre de los huracanes ocurridos en la región de estudio desde 1949 entre los 85° y 92° de longitud oeste, y los 17° y 29° de latitud norte.

Cuadro 19. – Nombre y año de los huracanes que han afectado la Península de Yucatán.

No.	Nombre	Año	No.	Nombre	Año	No.	Nombre	Año	No.	Nombre	Año
1	S/N	1949	26	HATTIE	1961	51	CAROLINE	1975	76	ARLENE	1993
2	S/N	1949	27	NOT	1964	52	ELOISE	1975	77	GERT	1993
3	BAKER	1950	28	HILDA	1964	53	SUBTROP	1976	78	ALBERTO	1994
4	HOW	1950	29	SBELL	1964	54	FRIEDA	1977	79	ALLISON	1995
5	ITEM	1950	30	S/N	1964	55	BESS	1978	80	OPAL	1995
6	CHARLIE	1951	31	S/N	1965	56	DEBRA	1978	81	ROXANNE	1995
7	HOW	1951	32	DEBBIE	1965	57	GRETA	1978	82	DOLLY	1996
8	NOT	1952	33	INEZ	1966	58	CLAUDETTE	1979	83	KYLE	1996
9	ALICE	1953	34	BEULAH	1967	59	FREDERIC	1979	84	MITCH	1998
10	S/N	1953	35	ABBY	1968	60	HENRI	1979	85	HARVEY	1999
11	FLORENCE	1953	36	CAMILLE	1969	61	ALLEN	1980	86	KATRINA	1999
12	HAZEL	1953	37	SUBTROP	1969	62	HERMINE	1980	87	KEITH	2000
13	HILDA	1955	38	LAURIE	1969	63	JEANNE	1980	88	GORDON	2000
14	JANET	1955	39	BECKY	1970	64	ALBERTO	1982	89	IRIS	2001
15	S/N	1956	40	CELIA	1970	65	DANNY	1985	90	SIDORE	2002
16	DORA	1956	41	ELLA	1970	66	ELENA	1985	91	LILI	2002
17	FLOSSY	1956	42	GRETA	1970	67	JUAN	1985	92	LARRY	2003
18	DEBBIE	1957	43	CHLOE	1971	68	DEBBY	1988			
19	ELLA	1958	44	EDITH	1971	69	FLORENCE	1988			
20	ARLENE	1959	45	LAURA	1971	70	GILBERT	1988			
21	IRENE	1959	46	AGNES	1972	71	KEITH	1988			
22	JUDITH	1959	47	BRENDA	1973	72	CHANTAL	1989			
23	ABBY	1960	48	DELIA	1973	73	KAREN	1989			
24	ETHEL	1960	49	SUBTROP	1974	74	DIANA	1990			
25	CARLA	1961	50	CARMEN	1974	75	FABIAN	1991			

Por otra parte, el estudio del impacto de fenómenos naturales para unidades del terreno específicas,

tiene mayor relevancia en términos de la estrategia de prevención y planificación territorial, que del análisis exclusivamente meteorológico de la ocurrencia de los fenómenos extraordinarios. Esto debido a que la magnitud o energía del evento no siempre tiene una correspondencia directa con la intensidad de los efectos destructivos. Se pueden observar eventos de intensidad menor con efectos destructivos amplios o viceversa. Esto dependerá de cómo el conjunto de las condiciones ambientales del paisaje asimilen el poder modificador o destructivo del fenómeno y de la trayectoria del mismo. En este sentido, se seleccionan los fenómenos de alta intensidad que históricamente han impactado la unidad tipificando los efectos destructivos o modificadores

Para consolidar el análisis de la información obtenida y establecer analogías válidas para los paisajes del área de estudio, se utilizó una conjunción del sistema experto y el sistema teórico. El sistema experto consiste en seleccionar sistemáticamente estudios científicos realizados por especialistas, sobre los efectos destructivos de los huracanes en ambientes costeros acumulativos y biogénicos similares y detectar principios de análisis repetibles para el área de estudio. A partir de estos datos, se desarrolla el sistema teórico que consiste en mapear el mayor número de factores que se considere puedan condicionar la susceptibilidad ante huracanes, y luego, se analiza su posible contribución.

El cumplimiento de cada etapa de la metodología conduce a la correlación de variables susceptibles de representación espacial (modelado cartográfico) dentro de un SIG, inicia bajo la línea guía del modelo conceptual y las variables ponderadas. Posteriormente, se evalúa la confiabilidad del modelo, cotejando resultados con el evento testigo representativo, para después editar la cartografía de la susceptibilidad. Si la evaluación resulta negativa se replantean los objetivos, variables y procedimientos de análisis. Como modelo exploratorio (Bankes, 1993), se manejan variables interdependientes que pueden no ser conocidas con precisión, por lo que siempre consideran un rango aceptable de incertidumbre. Esta se debe considerar como parte inherente de los pronósticos, siempre y cuando sea medible y controlable.

#### **III.2.3.1.1.- Modelo conceptual y análisis de variables de susceptibilidad.**

La susceptibilidad del terreno, expresa la facilidad con que un fenómeno puede ocurrir sobre la base de las condiciones locales del mismo. Es un concepto que forma parte del contexto de evaluación empleado para el estudio de los riesgos naturales (Verstappen,1992) y se integra a la valoración cualitativa o cuantitativa del daño potencial que un fenómeno de origen natural pueda ocasionar a los grupos humanos (Fig.36). Igualmente, forma parte del estudio científico del comportamiento del fenómeno perturbador o amenaza natural y de sus

efectos destructivos sobre el sociosistema afectable (población e infraestructura).

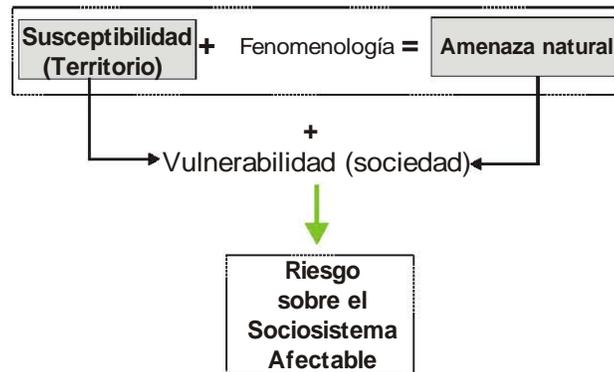


Figura 36.- Marco conceptual de la susceptibilidad del terreno ante la ocurrencia de una amenaza natural.

La expresión territorial de los efectos destructivos de un fenómeno natural y su relación con el entorno natural se enfoca principalmente bajo el concepto de susceptibilidad del territorio, que analiza la distribución espacial y correlación múltiple de las condiciones naturales del terreno, que predisponen la capacidad del paisaje para amortiguar o magnificar la incidencia directa de un fenómeno sobre un territorio específico. Se basa en el conocimiento del potencial destructivo extremo del conjunto de fenómenos ocurridos en el pasado (frecuencia, intensidad y magnitud) y su relación intrínseca con las condiciones naturales locales. En su sentido más amplio incorpora la fenomenología (estudio de la génesis, comportamiento y efectos destructivos de un fenómeno natural) del evento natural para integrar finalmente lo que se conoce como amenaza natural (Fig. 36). Sin embargo, es necesario destacar que la respuesta del territorio rebasa, en términos de la amenaza, la importancia del fenómeno en sí, debido entre otras razones a que:

- Ningún fenómeno natural de carácter destructivo se repite con las mismas características, por lo que la predictibilidad basada sólo en esta premisa no es del todo confiable (Lechat, 1990). Sin embargo, es necesariamente afirmativo que la ocurrencia futura, para la mayoría de los fenómenos, sólo se puede definir en función de la forma en que se han presentado en el pasado.
- Lo que determina un desastre no es tanto el tamaño del evento físico sino la incapacidad del paisaje y la comunidad afectada para absorberlo (Alexander, 1991).

Por otra parte, en su significado más específico, el estudio de la susceptibilidad se relaciona con la intensidad, que explica la expresión espacial de los distintos grados en fuerza y agresividad del fenómeno sobre porciones específicas del territorio. Es, por tanto, un estudio que requiere de un marco paisajístico y del

conocimiento preciso de las relaciones topológicas y corológicas, dentro y entre unidades del paisaje. Requiere información de los elementos del paisaje y de las relaciones funcionales que los mantienen en equilibrio dinámico, incluyendo las condiciones extremas que les ocasionan cambios.

Las variables más significativas propuestas en este trabajo, son en su concepción teórica individual y de conjunto, aporte original para evaluar la susceptibilidad del terreno ante la ocurrencia de huracanes en las costas bajas acumulativas inundables del suroeste de Campeche. Incluyen los siguientes componentes topológicos del paisaje: fijación biogénica, movilidad del sustrato, predisposición dinámica de las geoformas (interfase continental y marina), evidencias sedimentarias y morfológicas del oleaje de tormenta, ubicación relativa de la amenaza en perfil transversal de afectación y el comportamiento del fenómeno.

#### ▪Fijación biogénica.

Un concepto ecológico esencial para entender la capacidad de la vegetación para fijar o darle estabilidad al sustrato, es la relación resistencia-resiliencia. La estabilidad de un sistema depende de su resistencia o capacidad para contrarrestar los efectos de la inestabilidad y, por otra parte, de la resiliencia o capacidad del sistema para volver al estado de equilibrio (estado anterior o similar) una vez que haya sido perturbado. Esta dependerá del arreglo y estructura de los elementos que integran la unidad territorial y de la magnitud de la presión ejercida sobre ésta. Una unidad territorial puede romper su capacidad de resistencia al manifestarse un agente de presión y desplazarse hacia otro estado o condición. Sin embargo, existe la capacidad de retorno al estado inicial a pesar del impacto. Bajo este concepto se considera la relación directa entre los efectos destructivos del huracán como viento, oleaje e inundación y la capacidad de la vegetación para asimilarlos.

La identificación de las capacidades de la cubierta vegetal para asimilar los efectos de los huracanes en el área de estudio variará según los principales tipos de vegetación o uso del suelo, como son: especies de manglar, selvas tropicales (baja y mediana subperennifolias), pastizales inundables, tulares, cultivos arbóreos y herbáceos y suelos desnudos.

Para cubiertas arbóreas, en general, los efectos que un huracán puede tener, dependen de las siguientes características del árbol (adaptado de Van Breugel, 1994):

- La arquitectura del árbol; definida morfológicamente para un momento dado.
- La adaptación del individuo; árboles expuestos a la fuerza del viento por mucho tiempo son menos vulnerables a un impacto repentino.

- La fisonomía del parche donde crece el árbol; árboles que tienen las copas compactas y redondeadas causan menos turbulencia y por ende son más resistentes.
- El tamaño del árbol; árboles grandes son más susceptibles,
- La especie; algunas especies son más resistentes, debido a las características de su madera o su sistema radicular.
- La frecuencia del impacto; un impacto frecuente no deja que los árboles crezcan mucho en altura.
- Las características topográficas del paisaje en que se encuentran los árboles; las partes altas son más susceptibles al impacto del viento, sobre todo si el terreno tiene diferencias abruptas de altitud.

Las diferencias en las alturas relativas de los árboles con respecto a su entorno, provocan turbulencia que causa daños a la vegetación. Se pueden diferenciar dos tipos de relieve, el propio del terreno o geomorfológico, y el formado por el dosel del bosque. El impacto de un huracán es diferente según los tipos de selva, las especies que la componen, su estado de desarrollo y su organización, que en gran parte se refleja en las características del dosel (Boose *et al.*, 1994). La selva baja, en general, tiene un dosel con menos relieve o rugosidad que la selva mediana, por lo que es más resistente a la fuerza del viento.

Vester *et al.* (2000) detectaron que dentro del área de influencia del huracán Roxana, los transectos y parcelas que usaron como testigos, mostraron alrededor de un 50% de árboles con daños. De éstos, la mitad tuvieron daños que afectaron el potencial forestal del árbol (desenraizado, descopado y troncos rotos). Sin embargo, aunque el huracán tiene una estructura definida por cuadrantes, en cuanto a la distribución de vientos y lluvia, no se encontraron rastros diferenciales de daños en las selvas. Igualmente, no fueron notorios daños, menores a medida que se incrementaba la distancia a la costa. Esto quiere decir que, por lo menos las selvas tienen patrones espaciales aleatorios de daños que no responden, de forma específica, a la estructura de afectación del huracán o a su distancia al mar, sino a la cobertura areal total del fenómeno.

Para las selvas tropicales se detectó, de igual manera, que las unidades o etapas de sucesión evolutiva en la que se encuentren los parches o bosquetes es fundamental en el potencial tanto de daños, como de regeneración. Oldeman (1990) y Rossignol *et al.* (1998) señalan que según la arquitectura de los árboles y la organización del parche, se observan 4 fases de desarrollo: innovación, agradación, biostasis y degradación. En la fase de innovación se muestra un impacto reciente que destruyó parte del bosque y que está iniciando la regeneración de árboles, generalmente con muchas hierbas y bejucos. En la fase de agradación la regeneración del bosque ha formado un dosel irregular de árboles y/o arbustos. En la fase de biostasis todos los árboles del dosel, crecieron juntos y alcanzaron ya su máxima altura, formando una sola copa aplanada u ondulada. Para la fase de degradación los árboles del dosel se están degenerando, dejando pasar luz al suelo y acelerando el

crecimiento de plántulas y la germinación de semillas.

Según lo anterior, para el caso del huracán Roxana en las fases de agradación, que incluyen bosques secundarios de entre 30 y 40 años de edad, se observó resistencia generalizada al impacto por viento. Las eco-unidades en fase de biostasis resistieron el impacto por viento y erosión hídrica; los troncos se mantuvieron en pie y sólo se presentaron daños parciales en ramas. Esto se puede explicar por el desarrollo de un dosel compacto, donde las copas crecen juntas, formando una superficie ondulada a plana resistente al impacto del viento y la estabilidad en los horizontes superficiales de suelo. Las eco-unidades en fase de degradación se mostraron vulnerables, debido a la pérdida de la resistencia aerodinámica del dosel por envejecimiento de una o más copas o por perturbación en los bosquetes.

Por otra parte, la resistencia de las poblaciones de manglar, vegetación regularmente asociada a las zonas costeras tropicales ciclogénicas, presenta también respuestas específicas asociadas a la estructura del dosel, los sistemas radiculares, su posición relativa al ataque frontal de los huracanes, la edad y, por tanto, las especies. Smith *et al.* (1994) explican que si bien un área de manglar afectada por una perturbación tropical puede ocasionar cambios irreversibles en las condiciones ambientales originales, siempre existe una rápida recolonización alternativa de otras especies de manglar. Puede suceder que un área cubierta por *Rhizophora mangle* sea sustituida por *Avicennia germinans*, restaurando naturalmente la estabilidad de la línea de costa. Estos autores explican también, que una zona cubierta por manglar presenta erosión acelerada sólo cuando las ráfagas de viento levantan los árboles de raíz y originan discontinuidades topográficas susceptibles de ser erosionadas, sobre todo en costas arenosas. Lo anterior indica, que en general, la regeneración estructural de los manglares y su función estabilizadora del sustrato, muestra un alto potencial de asimilación y recuperación ante la presencia de huracanes. Sólo en el caso de manglares en estados sucesionales iniciales de baja densidad y área basal amplia, se han observado daños irreversibles por ráfagas de viento.

Los manglares del Golfo de México y Mar Caribe, alcanzan su madurez entre los 25 y 30 años (Twilley, 1999) mostrando una resistencia óptima a los efectos de los huracanes. Específicamente en la Laguna de Términos, presentan desarrollo saludable y cobertura densa en estado de madurez, en parte, porque no son impactados con frecuencia por huracanes.

Por otra parte, McBride *et al.* (1995) afirman que en costas acumulativas de barreras arenosas, relativamente elevadas y cubiertas por manglar, se tiende a la acreción o la estabilidad, aún en condiciones de tormenta. Smith *et al.* (1994) y McBride *et al.* (1995) coinciden en que el manglar desempeña una importante

función como fijador biogénico del sustrato.

Roth (1992) evaluó la capacidad de resistencia y regeneración de diferentes especies de manglares en el Atlántico nicaragüense, debido a los efectos destructivos del huracán Joan, en 1988. Elaboró índices de complejidad de la vegetación antes del huracán y registró la resistencia por especies después del huracán, encontrando lo siguiente (Cuadro 20):

Cuadro 20.- Atributos de resiliencia de las especies de manglar ante los efectos destructivos de los huracanes.

<i>Atributo</i>	<i>R. mangle</i>	<i>A. germinans</i>	<i>L. racemosa</i>
Resistencia al viento	Alto	Intermedio	Bajo
Resistencia al rompimiento	Alto	Intermedio	Bajo
Crecimiento del tronco dañado	Bajo	Intermedio	Alto
Densidad inicial de semillas	Bajo	Alto	Intermedio
Crecimiento promedio de semillas	Intermedio	Bajo	Alto
Promedio de supervivencia de semillas	Alto	Intermedio	Bajo

Según las observaciones de Roth (*op cit.*), *R. mangle* tiene alta resistencia al viento y al rompimiento de ramas y troncos. Igualmente muestra alta resiliencia al encontrarse un alto promedio de supervivencia de semillas, después de la ocurrencia del huracán Joan. El análisis de las respuestas observadas para el conjunto de las especies de manglar presentes en el Golfo de México y el Mar Caribe lleva a ponderar como más resistente, y por lo tanto, como más eficiente para la fijación biogénica, al mangle rojo (*R. mangle*). Esto debido, entre otras razones, al sistema radicular, las bajas tallas y la alta adaptabilidad al régimen intermareal. En orden decreciente de respuestas a los efectos destructivos de los huracanes se encuentran *A. germinans* y *L. racemosa* (Cuadro 20). Esta valoración es corroborada por Doyle *et al.* (1995) al evaluar los daños del huracán Andrew bajo velocidades promedio del viento de 40 ms<sup>-1</sup>. Sus observaciones confirman que bajo las mismas condiciones estructurales de dosel y de viento *L. racemosa* es más susceptible a los vientos extremos. A diferencia de las selvas tropicales los manglares si muestran un patrón de daños asociados a la trayectoria del huracán, de manera que la mitad frontal derecha, siempre ocasiona más daños, debido a las mayores velocidades de los vientos y precipitación.

La vegetación de tulares, juncuales y pastizales inundados, está regularmente influida por períodos de inundación continental o marina y estructuralmente pertenecen a los estratos herbáceos, por lo que presentan una alta adaptabilidad a condiciones ambientales extremas de agua y viento.

En lo que respecta a los usos humanos de la cubierta, la reducción de la permeabilidad incrementa exponencialmente los efectos destructivos de los huracanes. A medida que crecen las áreas impermeables, se

incrementan los daños por escorrentías, se inhibe la recarga de los acuíferos y se altera en su conjunto la hidrodinámica de las cuencas, con la subsecuente reducción de la calidad del agua, el incremento de la temperatura del suelo y los daños a la biodiversidad acuática. La modificación del balance infiltración-escorrentía, aplica en áreas donde el paisaje se está transformando rápidamente de condiciones naturales o seminaturales hacia zonas suburbanas y urbanas. De manera, que las zonas urbanas y suburbanas son más susceptibles por sobre los cultivos de escarda, los cultivos semipermanentes, la vegetación secundaria en estado sucesional y la vegetación original. La susceptibilidad aumenta a medida que se incrementa la densidad del conjunto de obras humanas (pavimentación, edificios, andenes, etc.).

La relación resistencia-resiliencia de los tipos de vegetación y de los usos del suelo en la zona costera, ante los efectos modificadores de los huracanes, tienen niveles de respuesta ponderables que se presentan en el cuadro 24.

**▪ Movilidad del sustrato.**

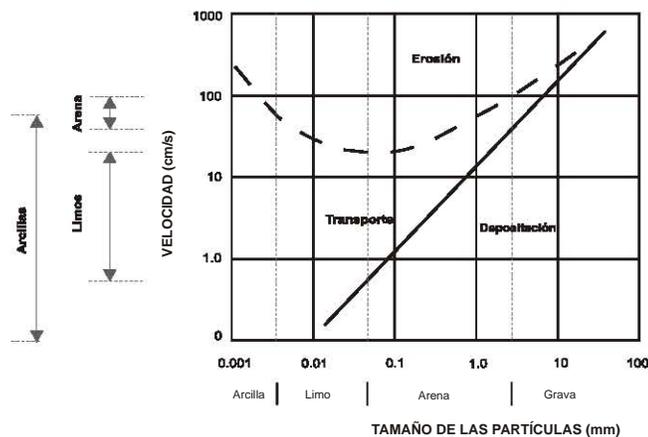
El sustrato presenta, en función de la consistencia y coherencia de sus partículas, menor o mayor oposición al movimiento generado por la energía hidrodinámica y aerodinámica de los huracanes.

En un régimen de transportación, donde la partícula no sufre variaciones en su tamaño y forma, la distancia a la que podrá ser llevada depende de su velocidad de caída, la velocidad del flujo y la turbulencia asociada al movimiento (Juanes *et al.*, 1985). Esto significa que para un mismo régimen hidrodinámico el alcance en el movimiento de las partículas dependerá únicamente de su velocidad de caída, que a su vez está condicionado por el diámetro, densidad y forma de las partículas. Por otra parte, la naturaleza terrígena o biogénica no es significativa en cuanto a la velocidad de caída, si se tienen diámetros iguales, esto debido a la similitud de sus pesos específicos (Cuadro 21). Ball (1967) y Medvediev (1982) señalan que las diferencias entre dos cuerpos de arena (playa, barras, islas barrera, etc.) formadas por sedimentos terrígenos y carbonatados no están tan bien definidas como sus semejanzas, ya que en condiciones topográficas e hidrodinámicas similares, las geoformas dependen muy poco de la naturaleza de las partículas.

Cuadro 21.- Relación de características granulométricas entre terrígenos y biogénicos.

	<i>Terrígenos</i>	<i>Biogénicos</i>
Componentes	Cuarzo y Feldespato	Calcita
Peso específico relativo(g)	2.65	2.72
Dureza relativa	6.7	3
Forma del grano	esferoide	aplanada

Según lo anterior y con ciertas reservas para algunos fragmentos esqueléticos biogénicos de mayor porosidad y flotabilidad, la característica más relevante de las partículas en cuanto a su disposición al movimiento en flujos hidrodinámicos, es su diámetro. Dentro de los tres principales grupos de partículas consideradas en sedimentología (arenas, limos y arcillas), las arenas presentan menor estabilidad o resistencia al movimiento que los limos y las arcillas. Si se observa la curva de Hjulstrom (1939), el rango de velocidades entre los cuales las arenas pasan de la depositación a la erosión (Fig. 37) es cuatro veces menor, que los limos, y seis veces menor, que las arcillas, en gran parte debido a que el sedimento arenoso es no cohesivo. Lo que en términos reales significa que, bajo altos regímenes hidrodinámicos, que son los que se presentan cuando ocurre un huracán, la disposición al movimiento de las arenas se rebasa más rápido que la de las otras partículas.



Basada parcialmente en Hjulstrom (1939)

Figura 37.- Curva de Hjulstrom reinterpreta.

Morton *et al.* (1995) comprobaron que después del huracán Alicia hubo entre 1.5 y 8 veces más movilización de arena que los promedios anuales registrados antes del huracán. Esto significa que, bajo condiciones de turbulencia extraordinaria, la distribución proporcional de partículas de diferente tamaño tiene implicaciones directas sobre los rasgos sedimentarios costeros. Esto significa que en costas arenosas los efectos son totalmente destructivos o modificadores del perfil de playa (Cooke and Doornkamp, 1990).

En costas arenosas, los efectos de los huracanes son muy evidentes (Cooke and Doornkamp, *op cit.*), generalmente dejan una berma de tormenta como límite de su acción hacia el continente y una serie de barras submarinas como evidencia costa afuera. Por otra parte, cuando las olas sobrelavan y rebasan el declive interior de la línea de dunas costeras, se produce un acarreo extraordinario de arena hacia los bajos y esteros adyacentes, originado lenguas o abanicos de *overwash* (sobre-sedimentación direccionada extraordinaria).

Según lo anterior, los sustratos no consolidados regulan su comportamiento hidrodinámico costero a partir del tamaño de las partículas. En zonas costeras bajas acumulativas, la movilidad y redistribución de arenas es, en definitiva, un indicador indirecto de la energía del fenómeno y, por lo tanto, de su intensidad a niveles puntuales.

#### ▪Predisposición dinámica de las geoformas costeras.

La forma, pendiente y volumen (extensión y altitudes relativas) de las geoformas costeras y su posición relativa respecto a la trayectoria de los huracanes, tiene un papel fundamental en el potencial destructivo de la marea de tormenta (*storm surge*) y las inundaciones asociadas, el oleaje de tormenta y el reflujos de tormenta (*ebb surge*). En este sentido, las geoformas tanto de la interfase continental o costa emergida como de la interfase marina o de topografía submarina, presentan diferente predisposición dinámica al avance y efectos modificadores del fenómeno.

Los procesos físicos asociados a los huracanes que impactan la interfase continental son: la marea de tormenta, el oleaje de tormenta, los vientos ciclogénicos y el reflujos de tormenta. Se ha observado que el impacto frontal de los huracanes en zonas costeras bajas, se concentra en geoformas arenosas biogénicas o terrígenas con pendientes menores a los 2° de inclinación y régimen intermareal. Posteriormente, con susceptibilidad alta y hacia el continente se encuentran las geoformas asociadas a los cuerpos de agua de transición costera, como los estuarios, lagunas costeras y planicies supramareales, ya que éstas experimentan los efectos de la sobre elevación extraordinaria del nivel del mar con la marea de tormenta. El resto de las unidades geomórficas presentan susceptibilidad baja o moderada dependiendo de la inclinación del terreno (pendiente), la geometría de la geoformas (cóncavas o convexas) y las rupturas de pendiente hacia altitudes mayores (Cuadro 22).

Cuadro 22.-Clasificación de la predisposición dinámica de las geoformas ante la ocurrencia de huracanes.

<b>Clasificación de la susceptibilidad geomórfico-costera</b>				
	Baja	Moderada	Alta	Muy Alta
Variable	1	2	3	4
Geoformas	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Acantilados bajos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Planicies de abrasión</li> <li>▪ Terrazas</li> <li>▪ Planicies aluviales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Planicies supramareales</li> <li>▪ Planicies palustres emergentes</li> <li>▪ Costas gravosas</li> <li>▪ Estuarios</li> <li>▪ Lagunas costeras</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Barras</li> <li>▪ Playas arenosas</li> <li>▪ Frentes deltaicos (canales y rampas de sedimentos)</li> <li>▪ Planicies intermareales</li> <li>▪ Planicies de cordones litorales</li> </ul>
Pendiente costera	> 6°	4-6°	2-4°	< 2°

En la *interfase marina*, la pendiente submarina y su oposición ante el ascenso del nivel del mar (marea de tormenta), el oleaje de tormenta y el sobrelavado, son los principales elementos a considerar en la movilidad del fenómeno y sus efectos modificadores sobre el paisaje costero. Las características geomorfológicas del perfil de playa permiten conocer el régimen de oleaje promedio y extremo y, por lo tanto, inferir su respuesta ante un huracán.

A partir de los tipos morfológicos del perfil de playa y la pendiente submarina se determinan cuatro variantes basadas en dos tipos principales de perfil de playa que son: disipativas y reflectivas (Brown y Mc Lachlan, 1990). Estos nombres responden a morfodinámicas identificables por la morfología costera y el parámetro,  $H_b/W_s \bullet T$ , que refleja la energía del oleaje, donde:

$H_b$  = altura de la rompiente (cm)

$W_s$  = velocidad de caída de la arena (cm/s) y

$T$  = periodo de la ola (s)

La descripción nominal de los perfiles de playa, para el caso específico de la energía extrema del avance de los huracanes hacia el continente, cumple una función inversa, es decir, la disipativa favorece el avance y la reflectiva lo restringe. A la pendiente disipativa le corresponden geomorfológicamente plataformas continentales extendidas de profundidad poco variable, resultado de la prolongación de estructuras geológicas continentales tabulares subhorizontales, de poca a nula actividad tectónica, o bien planicies de acumulación sucesiva de sedimentos terrígenos o biogénicos. Esto se refleja en la morfología costera a través de cordones litorales, barras y playas distribuidas a lo largo de una amplia zona de oleaje. En éstas, las olas tienden a ser del tipo *spilling* o de derrame e irrumpen a grandes distancias de la playa, a menudo formándose y rompiendo nuevamente.

Por el contrario, a la pendiente reflectiva le corresponden más bien rupturas de pendiente cercanas a costas de origen tectónico, biogénico o denudativo y tiene, en general, mayor capacidad para contener o reflejar la avanzada de los huracanes (Fig. 38). Las playas reflectivas ocurren cuando el sedimento es grueso. Aquí todo el sedimento es almacenado sobre la playa, sin zona de oleaje (*surf zone*) y las olas surgen directamente sobre la cara de la playa. Usualmente el rango mareal es pequeño y la cara de la playa está caracterizada por un peldaño sobre un fondo somero donde llegan las olas, y también por una berma sobre la pendiente intermareal. La energía de la ola es reflejada fuera de la cara de la playa.

El tipo de perfil de playa favorece o inhibe el avance o retroceso del oleaje y el ascenso del nivel del

mar durante las bajas presiones atmosféricas asociadas a los huracanes. Las zonas costeras bajas del área de estudio, presentan playas disipativas y son especialmente susceptibles a un incremento mínimo en el nivel del mar, propiciando naturalmente un avance tierra adentro del fenómeno.

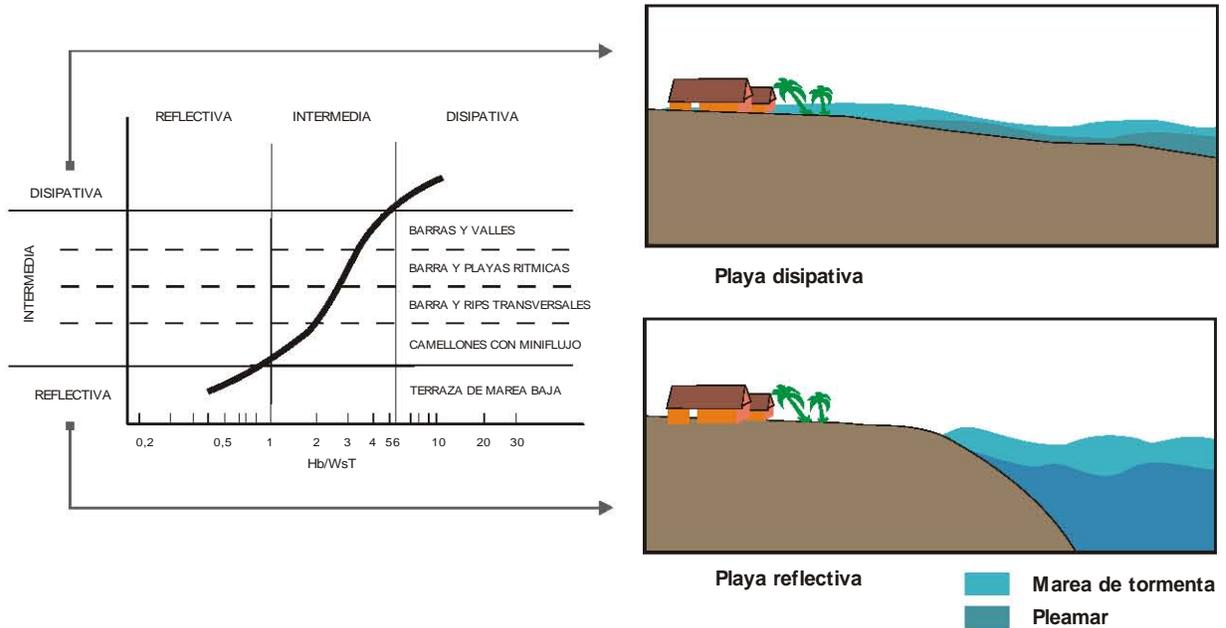
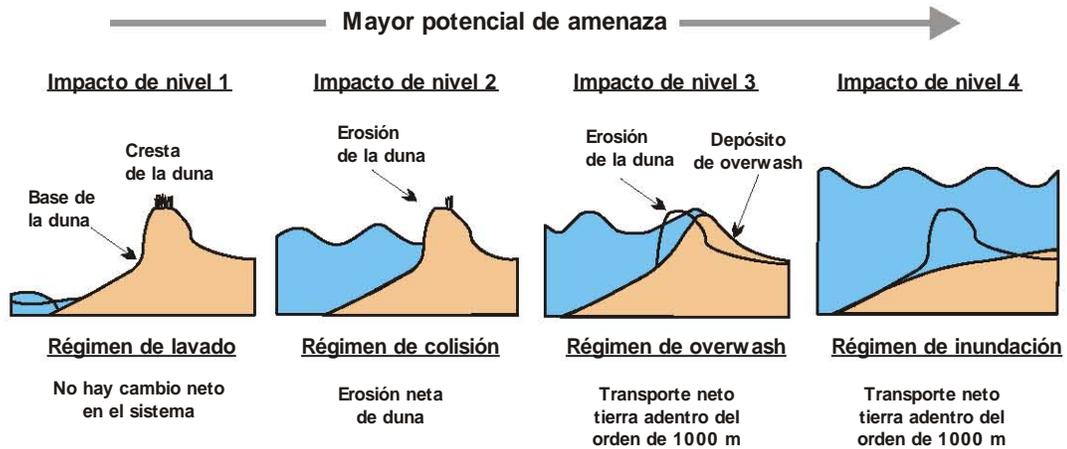


Figura 38.- Movilidad de la marea de tormenta sobre perfiles de playa típicos y pendiente submarina adyacente.

### ■ Evidencias sedimentarias y morfológicas del oleaje de tormenta.

El potencial destructivo de los huracanes, se puede deducir en ambientes acumulativos arenosos a través de evidencias sedimentarias y morfológicas. Cuando se presenta un huracán, el oleaje y la marea de tormenta ocasionan cambios notorios en la morfología litoral. Los niveles de afectación se agrupan en cuatro niveles de impacto (Morton, 2002b) adaptados al paisaje costero del área de estudio (Fig. 39). En el nivel 1, se presenta el lavado de la pendiente de playa por ascenso del nivel del mar, sin embargo, el oleaje no erosiona aún la base de la duna. Para el nivel 2, se inicia la erosión sobre la base de la duna y en ese nivel se contienen los volúmenes de agua. Al incrementarse la intensidad del huracán se llega al nivel 3 o de *overwash*, donde se modifica drásticamente la morfología costera, destruyendo o trasladando la duna y originando canales de tormenta (*ebb channels*) y depósitos de *overwash* en distintas modalidades (lengüetas, terrazas, abanicos). Esta clasificación es aplicable a planicies de cordones litorales o barreras arenosas, que mantienen comunicación con cuerpos o canales de agua hacia el interior del continente.

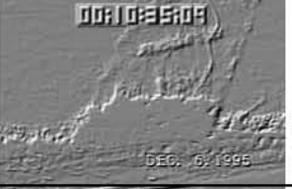
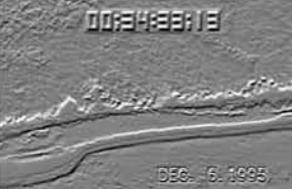


Clasificación de las características y respuestas sedimentarias inducidas por tormentas			
	Emplazamiento	Isla Barrera	
		Nivel del mar $\geq$ Nivel de la laguna	Nivel del mar $<$ Nivel de la laguna
Nivel del mar $<$ duna, o sin duna, escalón de berma	Tierra firme incluyendo planicies de cordones litorales Erosión (y acreción ocasional debido a la migración de la berma) confinada a la playa <b>Impacto de nivel 1</b>	La duna esta erosionada <b>Impacto de nivel 2</b>	Sobrelavado y flujo a través de canales, rasgos sedimentarios indicando flujo de la laguna hacia el océano <b>Impacto de nivel 4</b>
Nivel del mar $\geq$ duna o, si no hay duna, escalón de berma	Terraza de <i>washover</i> <b>Impacto de nivel 3</b>	Abanicos de <i>overwash</i> hacia el interior dispuestos en estratos laminares <b>Impacto de nivel 3</b> Incisión de canales ( <i>ebb channels</i> ) <b>Impacto de nivel 4</b>	.....

Figura 39. – Rasgos sedimentarios y morfológicos asociados a la energía de los huracanes en costas arenosas.

Para el área de estudio se tipificaron las geoformas según la intensidad de los regímenes de energía asociados a huracanes de alta intensidad. El huracán Roxana, ocurrido en 1995, fue utilizado como fenómeno representativo de ocurrencia extrema identificando, mediante videogramas, geoformas nuevas producto de la erosión o acreción longitudinal o perpendicular y geoformas modificadas en su morfología e hidrodinámica, a lo largo de toda la costa acumulativa arenosa de la Campeche. A los cortes de video representativos de los cambios en la morfología costera, se les aplicó un filtro direccional para destacar los bordes e identificar con claridad los cambios morfológicos (Cuadro 23).

Cuadro 23.-Clasificación de las geoformas como indicadores de susceptibilidad ante la ocurrencia de huracanes.

<i>Tipos de respuesta morfológica ante la ocurrencia de huracanes</i>			
<b>Geoformas</b>	<b>Imagen de video representativa</b>	<b>Filtro direccional aplicado a la imagen de video para destacar los principales rasgos morfológicos</b>	<b>Nivel de susceptibilidad</b>
<b>Duna: Estable</b> <b>Inestable</b> <b>Berma de tormenta</b>			<b>Moderado bajo</b>
<b>Nuevas flechas</b>			<b>Moderado</b>
<b>Overwash</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Terraza</li> <li>▪ Abanico</li> </ul>			<b>Alto</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Terraza redondeada</li> </ul>		
<b>Bocas (rompimiento perpendicular)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nueva</li> </ul>			<b>Extremo</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Migración</li> <li>▪ Apertura de paleo-bocas</li> </ul>		
<b>Barras emergentes (rompimiento longitudinal)</b>			

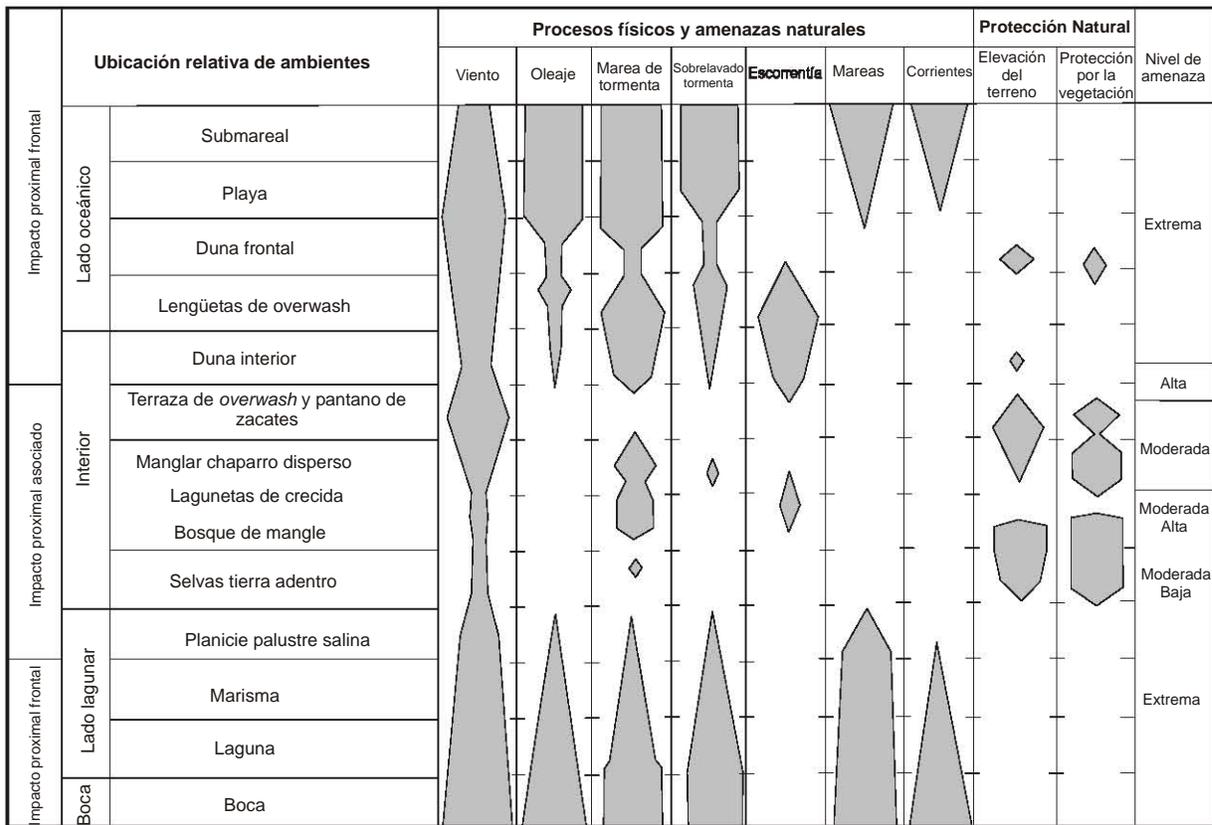
### **Ubicación relativa de la amenaza en el perfil transversal de afectación y su relación con los procesos físicos.**

La intensidad y magnitud de los huracanes se pueden caracterizar por el conjunto de evidencias o modificaciones registradas en cada unidad del terreno. A su vez, cada unidad muestra diferentes grados de exposición al fenómeno, según su ubicación relativa ante la trayectoria preferente, intensidad y recurrencia del fenómeno. De manera, que en perfil transversal del océano hacia el interior del continente y a partir del momento en que el huracán toca tierra, se pueden distinguir dos tipos de impacto: el proximal frontal y proximal asociado.

En el impacto proximal frontal, las unidades del terreno resienten toda la energía del fenómeno y todos los procesos físicos asociados al huracán, como vientos ciclogénicos, oleaje de tormenta, marea de tormenta y reflujo de tormenta, dejando evidencias o daños que permiten diferenciar los mayores efectos destructivos y grados de amenaza.

Por otra parte, el impacto proximal asociado se refiere al impacto directo atenuado al momento en que el huracán toca tierra o bien al área de cobertura del fenómeno y sus efectos destructivos o modificadores. A diferencia del impacto proximal frontal, se presentan diferentes modalidades extendidas de daños por vientos e inundaciones y no se muestran efectos físicos derivados del oleaje o la marea de tormenta.

El impacto proximal frontal se presenta en las geoformas expuestas hacia el océano, como bocas y marismas (Fig. 40) en dos niveles de impacto denominados A y B. En A, se presentan todos los efectos destructivos y, en B, solo reflujo de tormenta, inundaciones, y vientos. Por otra parte, el impacto proximal ocurre en geoformas de transición mar-continente (Fig. 40) y tiene que ver con los niveles C y D, donde solo se presentan inundaciones y viento para el nivel C y vientos para el nivel D. Igualmente la ubicación relativa de la amenaza es diferenciable en función de la protección por fijación biogénica y la altura relativa del terreno. Bajo condiciones de peligrosidad extrema, la diferencia de centímetros puede marcar la diferencia en la extensión de las inundaciones y el avance del mar hacia el continente. Los impactos son diferenciables a escalas semidetalladas y detalladas, por lo que siempre es conveniente llegar a ese nivel de levantamiento para identificar los grados de amenaza potencial.



El ancho de la banda gris muestra la intensidad o frecuencia de proceso

Modificado de Pilkey, 1987

Figura 40.- Tipo de impacto por huracanes, procesos físicos asociados y afectación según el tipo de ambiente costero.

▪ Régimen intermareal.

El régimen intermareal es una condicionante regional cíclica del nivel del mar que bajo condiciones específicas contribuye a incrementar o disminuir la movilidad vertical de los volúmenes de agua costeras durante la permanencia de los huracanes sobre la interfase marina. Esta condición es especialmente importante en zonas costeras bajas acumulativas deltaicas o estuarinas. Hayes (1975) define tres rangos de marea: micromareal, mesomareal y macromareal. Los rangos micromareales se encuentran por debajo de los 2 m, domina la acción de los vientos y las olas, su influencia se siente principalmente en las bocas y sus principales formas acumulativas son las playas, cordones litorales y abanicos de *overwash*. Los rangos mesomareales se encuentran entre 2 y 4 m, son los más comunes; dominan las corrientes mareales por sobre las litorales o fluviales, propiciando la formación de deltas mareales, pantanos salinos y marismas. En cuanto a los rangos macromareales, son los menos estudiados y alcanzan más de 4 m de pleamar. Por la importancia de su avance sobre el terreno

continental tiene efectos significativos, tanto en la morfología del terreno, como en la dinámica ecológica costera.

Cuando los niveles de análisis abarcan varias regiones costeras, las diferencias de régimen intermareal son importantes en el cálculo de los niveles promedio esperados ante el ascenso extraordinario del nivel del mar. Si por el contrario, el área de estudio se restringe a unidades del paisaje específicas, es importante conocer la variabilidad topográfica local y los volúmenes de las geoformas litorales, como condicionantes del ascenso del nivel del mar ante la ocurrencia de un huracán.

#### **▪ Fenomenología.**

El estudio de la fenomenología comprende el comportamiento del fenómeno en su génesis, desarrollo, temporalidad, intensidad, magnitud y efectos destructivos. La mayoría de estas características son resumidas en las cinco categorías de la escala Saffir-Simpson. Sin embargo, el comportamiento, esperado de los fenómenos para unidades del terreno, debe considerar huracanes con categorías, periodos de retorno e intensidades específicas. Aunque el análisis de las variables ya incluye una relación intrínseca con los efectos esperados para huracanes de alta intensidad, como información específica se debe considerar la frecuencia de las trayectorias ciclónicas, la intensidad del viento ciclónico máximo y la altura de ola máxima histórica para unidades específicas del terreno. Esta zona registra un total de 90 avisos con la probabilidad máxima de 47.8% para huracanes clase 1 y probabilidades nulas para huracanes clase 4 y clase 5 (Díaz-Hernández, 2001).

#### **▪ Ponderación multicriterio de variables de susceptibilidad y modelado cartográfico en un SIG.**

Los grados de susceptibilidad son determinados según las variables y criterios antes expuestos y la observación sistemática y ponderada de indicadores paisajísticos postevento. Cada variable tiene un valor numérico ponderado, según el registro histórico de la intensidad de los cambios o destrucción ocasionada por los huracanes en el pasado. Los valores tienen un significado individual y conjunto en las formas de asimilación de los efectos destructivos del fenómeno, y se establece a través de observaciones directas en campo, registros visuales (imágenes de video, fotos), cartografía detallada, el análisis histórico-probabilístico de efectos destructivos y el conjunto de observaciones científicas de expertos para paisajes y fenómenos similares en el Golfo de México y el Mar Caribe.

La determinación de la susceptibilidad se basa en el modelo conceptual como guía para la selección de variables y en el análisis multicriterio para la valoración integral de la susceptibilidad por unidad del terreno.

Resulta de la determinación directa y/o cálculo de los indicadores más la aplicación del sistema rangos-pesos y factores de ponderación, y permite asignar un valor global a todos los impactos concurrentes en cada ciclo o periodo de medición. El cálculo numérico para la asignación de un sistema de pesos tiene en cuenta la importancia de cada indicador, de ahí que sean previsibles ciertas variaciones al ser aplicados en distintos contextos.

El análisis multicriterio cumple las siguientes etapas:

- Fichas de caracterización, sintetizando la información disponible por unidad del terreno.
- Elección de las variables relevantes para cada situación específica.
- Jerarquización de las variables de acuerdo con su magnitud.
- Determinación de los intervalos del rango, explicados y establecidos, de forma arbitraria, en base a conceptos técnicos y empíricos de intensidad y escala.
- Asignación de un factor de ponderación y/o corrección a cada rango de las variables, en función de su importancia relativa y la concurrencia de impactos acumulativos y sinergismos.
- Cálculo de la sumatoria de los productos de la multiplicación de los rangos de cada variable por su peso y factor de ponderación.
- Atribución de una categoría o nivel de ponderación final a cada resultado numérico del cálculo cualitativo de rangos-pesos propuesto, dentro de las siguientes clases: muy alta, alta, media y baja.

Con estos resultados se procede a la representación espacial en dos etapas consecutivas:

- Asignación de achures o colores de las clases obtenidas de la ponderación por unidad del terreno.
- Trazado de la polilínea envolvente que bordea los campos del polígono de evaluación multicriterio, en el caso de coincidencias por rangos y unidades del terreno.

Los valores de ponderación por variable, se resumen en el siguiente cuadro (Cuadro 24):

Cuadro 24.- Variables ponderadas para evaluar la susceptibilidad del terreno ante la ocurrencia de huracanes.

<b>Criterios de susceptibilidad</b>	<b>Variables de ponderación</b>			<b>Valor</b>
<b>S1 Fijación biogénica Resistencia-Resiliencia</b>	Manglar	Rhizophora mangle		0.10
		Avicennia germinans		0.20
		Laguncularia racemosa		0.30
	Tulares y pastizales inundados			0.40
	Selvas tropicales			0.50
	Vegetación de dunas costeras			0.60
	Cultivos abiertos			0.80
	Superficies desnudas e impermeables			1.00
<b>S2 Movilidad del sustrato</b>	Rocoso			0.25
	Limo-arcillosos			0.50
	Arena y fragmentos de conchas			0.75
	Arena			1.00
<b>Predisposición dinámica de las geoformas costeras S3 Interfase marina</b>	Reflectiva			0.33
	Mixta			0.66
	Disipativa			1.00
<b>S3 Interfase continental</b>	Acantilados > 1m			0.30
	Terrazas, rampas y acantilados bajos (< de 1 m)			0.60
	Planicies bajas acumulativas (< de 1 m)			1.00
<b>S4 Régimen intermareal</b>	Micromareal			0.30
	Mesomareal			0.60
	Macromareal			1.00
<b>S5 Evidencias morfodinámicas del oleaje de tormenta (rasgos sedimentarios y morfológicos asociados)</b>	Nivel 1			0.25
	Nivel 2			0.50
	Nivel 3			0.75
	Nivel 4			1.00
<b>S6 Ubicación relativa de la amenaza en perfil transversal de afectación</b>	Impacto proximal frontal	A (oleaje de tormenta, marea de tormenta, viento y reflujo)		1.0
		B (viento, marea de tormenta y reflujo)		0.75
	Impacto proximal asociado	C (viento, inundación)		0.50
		D (viento)		0.25
<b>S7 Fenomenología</b>	Frecuencia de trayectorias ciclónicas (entre 1899-2002)	Baja	0.33	Peligrosidad total de fenomenología  $\Sigma /4$ 0-1
		Media	0.66	
		Alta	1.00	
	Categoría Saffir-Simpson	1 y 2	0.33	
		3	0.66	
		4 y 5	1.00	
	Intensidad del viento ciclónico máximo	Baja	0.33	
		Media	0.66	
		Alta	1.00	
	Altura de ola máxima histórica	Baja	0.33	
		Media	0.66	
		Alta	1.00	

Para el cálculo de la sumatoria de las variables, según su valor ponderado, se aplica la siguiente fórmula, en donde se destaca la importancia relativa de cada variable en función (*f*) del probable escenario de susceptibilidad (*S*):

$$f(S) = \Sigma ((S1 * 0.25) + (S2 * 0.15) + (S3 * 0.20) + (S4 * 0.20) + (S5 * 0.75) + (S6 * 0.050) + (S7 * 0.075))$$

El producto final de la sumatoria representa el 100% de las variables y valores, ubicando los umbrales entre cero y uno. De tal forma, que la susceptibilidad máxima será el equivalente numérico máximo predeterminado que es uno. A partir de la interpretación de los resultados se establecen convencionalmente cuatro rangos determinados por los extremos: *S muy alta*, entre 0.75 - 1.0; *S alta*, entre 0.50 - 0.74, y *S media*, entre 0.25 y 0.49 y *S baja* < de 0.24.

La ponderación del conjunto de variables se traslada para su modelamiento cartográfico a unidades del terreno limitadas por un primer corredor o *buffer* de 750 m de amplitud, a partir de la línea de costa para el impacto proximal frontal y un segundo *buffer* hasta 45 km, ambos cortando cinco coberturas ponderadas en formato *raster*.

### III.2.3.2.-Resultados.

Para el área de estudio, la fenomenología muestra que la Laguna de Términos es de las más protegidas de la Península de Yucatán, con una afectación por huracanes de alta intensidad menor, que en el resto de la península. La razón de esta comportamiento es que entre las zonas ciclogénicas del Atlántico y el área de estudio se interpone una extensión de casi 500 km de terreno continental que inhibe la energía termodinámica del fenómeno. Esta zona registra un total de 90 avisos con la probabilidad máxima de 47.8% para huracanes clase 1 y probabilidades nulas para huracanes clase 4 y clase 5 (Díaz-Hernández, 2001).

A partir de la suma ponderada de los mapas analíticos, en formatos *raster*, se obtiene un mapa síntesis de susceptibilidad, en donde se encontraron 21 unidades del terreno, resultado de la cobertura de afectación y dinámica de los fenómenos de alta intensidad. De las 21 unidades, 3 son de susceptibilidad muy alta, 9 de susceptibilidad alta, 6 de susceptibilidad media, 2 de susceptibilidad baja y una de impacto proximal asociado (Fig. 41).

La utilidad práctica del mapa consiste en ubicar zonas con distintos grados de alerta y de atención prioritaria, según grados de afectación probable ante la ocurrencia de un huracán de alta intensidad. A medida que se conozca con mayor detalle el terreno y se tipifiquen mejor los efectos modificadores o destructivos, se podrán elaborar mapas de escala mayor y confiabilidad más alta. Por el momento y debido al nivel de detalle en el conocimiento del terreno, sólo se pueden obtener mapas de escalas medias.

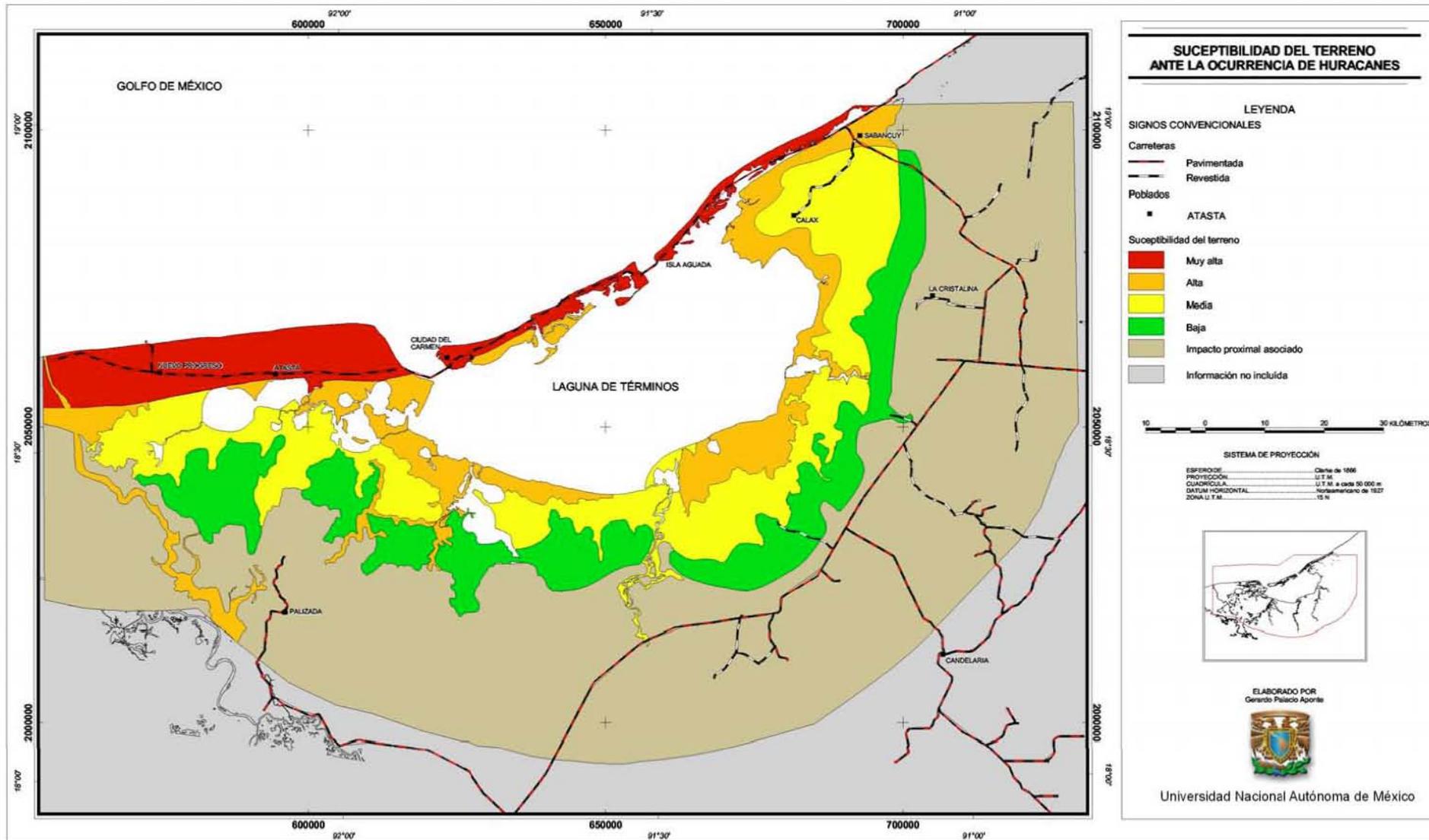


Figura 41.- Zonificación de la susceptibilidad del terreno ante la ocurrencia de huracanes en la Laguna de Términos, Camp.

## **CONCLUSIONES GENERALES.**

Para el paisaje costero es fundamental entender su emplazamiento a partir del funcionamiento y complejidad territorial de sus interfases (marina y continental), utilizando principios genéticos, de homogeneidad relativa, variables clave y particularidades funcionales, propias de la interacción costera, como la conectividad. Aunque el concepto de conectividad propuesto en este trabajo no hace referencia a particularidades ecológicas de especies vegetales o animales, sino a la expresión territorial de los elementos del paisaje que son evidencia de interacción entre interfases, se comprobó que si es posible identificar espacialmente su complejidad funcional. Para los humedales costeros tropicales de génesis fluvio-deltaica estuarina en la Laguna de Términos, Camp., la evaluación de la conectividad se basa en relaciones corológicas de cobertura amplia sobre planicies inundables extendidas. La modalidad de la influencia bidireccional o recíproca de los subprocesos y elementos del paisaje costero, es la de mayor relevancia en la definición de los rangos de conectividad. Los subprocesos de influencia recíproca se pueden caracterizar como subprocesos primarios o diferenciadores y el resto como subprocesos asociados o secundarios.

Dentro de todas las posibles interacciones locales o puntuales, se puede hablar del carácter esencial de variabilidad promedio delimitada espacialmente, en comparación con las fluctuaciones intrínsecas puntuales de sus componentes. Esto significa que, aunque existan innumerables evidencias de procesos ecológicos puntuales, siempre se podrán establecer fronteras espaciales basadas en abstracciones, donde existan comportamientos funcionales o elementos dominantes generalizables e indicadores de interacción corológica.

En la actualidad, los procedimientos para identificar las unidades del paisaje costero ya no solo se basan en el criterio del experto y los métodos morfométricos, sino que se apoya en procesos derivados del análisis de imágenes de satélite de alta resolución, geoestadística, estadística multivariada y análisis espacial en el SIG. Estos apoyos reducen la subjetividad del intérprete y permiten justificar, mediante estadística espacial, el emplazamiento de las fronteras de las unidades del paisaje. Para el paisaje costero se pueden inferir incluso, fronteras promedio no visibles en ambientes acuáticos, donde los parámetros físico-químicos presentan comportamientos difusos y alta variabilidad diaria, estacional y anual.

En el paisaje costero como en ningún otro, los vínculos hidrológicos son la base funcional y expresión genética de todas las unidades del paisaje. La movilidad y permanencia de las aguas costeras sobre un territorio específico, condicionan el comportamiento eco-geográfico y dinámica de las fronteras en las unidades del

paisaje costero en forma directa e indirecta. Existe una transformación constante de las fronteras de las unidades del paisaje donde existe una fluctuación rítmica predecible de los niveles de marea, los regímenes de oleaje y las corrientes de deriva litoral.

El régimen de marea es uno de los factores principales en la evolución costera y en específico para la evolución de los estuarios, ya que el número de horas de exposición y sumersión controla directamente la zonación bio-sedimentaria existente en la franja intermareal. Además, la marea es la responsable de los volúmenes de intercambio que se producen entre las diferentes masas de agua que circulan por los estuarios; estos volúmenes condicionan directamente la capacidad de dilución e intercambio de cualquier sustancia que de forma natural o antrópica se vierta en el sistema acuático.

Aunque las mareas están relacionadas de forma importante con la fisiografía del terreno costero, la morfología de los depósitos sedimentarios variará en función de los rangos de marea. Dentro de la clasificación propuesta por Davies (1964), el Golfo de México se ubica dentro de los estuarios micromareales con rangos menores a dos metros. Son ambientes propicios para la evolución de frentes deltaicos y su principal influencia se siente en las bocas. A causa de la escasa profundidad del agua, la influencia del oleaje en la formación del fondo marino es menor que la del flujo y reflujos del agua. El mar aporta sedimentos finos, arena, plancton y nutrientes, que se depositan cuando las velocidades de las corrientes son escasas. Este hábitat anfíbio alberga una gran diversidad de organismos vegetales y animales, que enriquecen el suelo con material orgánico y forman parte de una compleja red trófica.

La clasificación de las unidades del paisaje costero requiere de adecuaciones en la concepción y metodologías originales para la delimitación de las unidades del paisaje, incorporando, a la definición de geosistemas y geofacies, criterios funcionales dinámicos con ámbitos territoriales inferidos, tanto a través de indicadores visibles o directos, como a través de indicadores no visibles o indirectos. En la Laguna de Términos, Camp., la delimitación de los 13 geosistemas, se basó en los ámbitos funcionales dominantes y las 12 geofacies, en los subprocesos asociados al comportamiento funcional dominante de mayor cobertura territorial. Igualmente debido a la variabilidad diaria, estacional y anual que presentan las fronteras en el paisaje costero, es importante señalar, si la delimitación promedio de las fronteras paisajísticas, responde a cambios cíclicos u ordinarios, a cambios extraordinarios, o a la conjunción de ambos.

La fragmentación o número de parches o parcelas en un área específica refleja, por una parte, la diversidad del paisaje por unidad de área para la escala del levantamiento, y por otra, el grado de perturbación o

parcelización de los hábitats originales. Por lo tanto, no existe en realidad una relación lineal entre número de parches y los regímenes de perturbación. Lo realmente significativo entonces es la cobertura de los grados de modificación, que son además más útiles si se estudian en niveles de levantamiento detallado. Los niveles de perturbación por unidad del paisaje reflejan condiciones promedio de modificación para niveles de levantamiento por geosistemas y geofacies, sin embargo, a nivel de geotopo se destacan con mayor relevancia las modificaciones puntuales.

El uso de la clasificación por eco-unidades como unidades de vegetación con estadios evolutivos característicos, permite clasificar fisonómicamente y mediante analogías geográficas, el grado de modificación de la cobertura vegetal en un paisaje específico. En la Laguna de Términos, Camp. la geofacie palustre intermareal de régimen extraordinario y la geofacie litoral de isla barrera, han mostrado grados de modificación alto y muy alto, respectivamente.

Para la resolución espacial de las imágenes Landsat, las situaciones extremas de pérdida o ganancia de tierras no presentan, en general, cambios catastróficos o extremos en la región, sino más bien son resultado de la propia dinámica del sistema costero. Salvo en el litoral oeste de punta Zacatal, las tendencias erosivas sin alternancia de fases acumulativas, son evidencia de patrones anómalos en el balance sedimentario de los geosistemas litorales de la región occidental en el área de estudio. Esta situación se puede explicar como resultado de hundimientos diferenciales del terreno en frentes sucesivos de avance deltaico inactivos.

Los resultados obtenidos de la zonificación de la susceptibilidad del terreno ante la ocurrencia de huracanes, permiten concluir que su estudio depende, en primera instancia, de la escala espacial y temporal con que el fenómeno perturbador se presente, de tal forma, que la aplicación de modelos responde siempre a realidades ambientales concretas y a fenomenologías irrepetibles. Sin embargo, existen formas de asimilación esperables de los elementos del paisaje ante la ocurrencia de fenómenos específicos, que sí se pueden obtener de la aplicación de un modelo conceptual inicial. De la misma manera, las premisas conceptuales y metodológicas generales expuestas son aplicables a cualquier situación de amenaza.

La zonificación de susceptibilidad del terreno ante la ocurrencia de huracanes, depende en primera instancia de la escala espacial de los efectos destructivos y el análisis temporal con que el fenómeno perturbador se presente. De tal forma, que la aplicación de modelos responde siempre a realidades ambientales concretas y con frecuencia a fenomenologías irrepetibles. Sin embargo, existen formas de asimilación esperables de los elementos del paisaje ante la ocurrencia de fenómenos específicos, que sí se pueden obtener

de la aplicación del modelo conceptual propuesto en este trabajo. Su eficiencia radica en el detalle de la caracterización de las unidades del paisaje.

Los mapas de susceptibilidad del terreno incluyen cierto grado de incertidumbre condicionada por el comportamiento probable del huracán, su categoría y por la interpretación de las evidencias destructivas o modificadoras en el paisaje. Una vez que se han interpretado correctamente las evidencias se debe constatar la confiabilidad de los materiales cartográficos, la calidad de la interpretación del cartógrafo especialista y los procedimientos de análisis en el SIG. La subjetividad inherente a la interpretación del analista se reduce a medida que se incrementa el uso de parámetros cuantitativos validados estadísticamente y siempre a partir de criterios verificables en campo. A medida que se conozca con mayor detalle la respuesta de cada elemento del paisaje ante la ocurrencia de huracanes a niveles locales, se podrán elaborar mapas de escala mayor y confiabilidad más alta. Esto se puede resolver si se establece una estrategia de monitoreos periódicos sobre áreas y/o transectos testigos antes y después de la ocurrencia de huracanes en áreas de reconocida afectación histórica.

El sistema de alertamiento temprano de las zonas costeras es una forma adicional de alerta ante la amenaza por huracanes en tiempo real, que deberá incluirse en futuros trabajos. Consiste en generar un cruce de circunferencias de influencia geográficas y superponerlas a la capa geográfica de localidades y municipios de la región en cuestión. El criterio de generación de las circunferencias de influencia por la acción de los huracanes se toma de la propuesta de Saffir-Simpson, que relaciona la intensidad del evento con radios de afectación para diferentes intensidades de huracán. Esto quiere decir, por ejemplo, que si se presenta un huracán clase 2, se tendrá una afectación equivalente a la acción de una depresión tropical en el área definida entre 200 y 150 kilómetros a partir del centro del huracán y una afectación directa de un huracán clase 2 dentro de un radio de afectación de 60 kilómetros.

Los efectos destructivos de los fenómenos naturales pueden ser aislados o extendidos y no se expresan en límites espaciales perfectamente geométricos, sin embargo, en algunos casos se pueden identificar patrones espaciales más o menos definidos en función de condiciones geológico-geomorfológicas y bióticas con cierto grado de homogeneidad. Esta condición permite establecer analogías geográficas útiles en la caracterización de la susceptibilidad y la amenaza de lugares con poca o nula información, sobre el comportamiento y efectos de los huracanes. Lo anterior confirma la importancia del análisis condicional y la

utilidad de las unidades del terreno como base del estudio territorial de la amenaza. Para la Laguna de Términos, las unidades del paisaje más susceptibles ante la ocurrencia de huracanes, son las geofacies litoral de cordones litorales y litoral de isla barrera. Ambas en su vertiente expuesta de barlovento, sin elementos de fijación biogénica y sobre las bocas de Puerto Real y Carmen.

Los geoindicadores son herramientas teórico-metodológicas para el diagnóstico ambiental, que permiten interpretar información compleja y dispersa sobre el estado del medio ambiente, y transformarla en información utilizable para la toma de decisiones. Su aplicación sobre unidades funcionalmente homogéneas hace más eficiente la identificación de problemas ambientales con expresión territorial y permite priorizar su atención.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Alexander David (1991), "Applied Geomorphology and the impact of Natural Hazards on the Built Environment", *Natural Hazards*. Kluwer Academic Publishers. Netherlands, 4: 57-80.
- ASERCA (1997), *Situación actual del Arroz Nacional*. En: Claridades Agropecuarias, México, D.F. 75 p.
- Baban, S.M.J. (1993), "Detecting water quality parameters in Norfolk Broadas, U.K., using Landsat imagery". *Int. J. Remote Sensing*, 14:247-267.
- Ball, M. M. (1967), "Carbonate sand bodies of Florida and the Bahamas" *Journal of Sedimentary Petrology*, 37 (2):556-591.
- Bankes, S. (1993), Exploratory modeling for policy analysis. *Operations Research* 41: 435-449.
- Baudry J. (1984), Effects of landscape structures on biological communities: the case of hedgerow network landscapes. In: Brandt J. and Agger P. (eds.) *Methodologies in landscape ecological research and planning*. Vol I. Proceedings of the First International Seminar of the International Association of Landscape Ecology. Roskilde. Denmark. October 15-19. pp. 55-65.
- Bautista, F., G. Palacio-Aponte, M. Ortiz-Pérez, E. Batllori-Sampedro y M. Castillo-González, 2005. El origen y el manejo maya de las geoformas, suelos y aguas en la Península de Yucatán, p. 21- 32. En: F. Bautista y G. Palacio (Eds.) *Caracterización y Manejo de los Suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones Agropecuarias, Forestales y Ambientales*. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, Instituto Nacional de Ecología. 282 p.
- Berger, A.R. & W.J. Iams Eds. (1996), *Geoindicators: assessing rapid environmental change in earth systems*. Rotterdam: A. A. Balkema, 466 p.

utilidad de las unidades del terreno como base del estudio territorial de la amenaza. Para la Laguna de Términos, las unidades del paisaje más susceptibles ante la ocurrencia de huracanes, son las geofacies litoral de cordones litorales y litoral de isla barrera. Ambas en su vertiente expuesta de barlovento, sin elementos de fijación biogénica y sobre las bocas de Puerto Real y Carmen.

Los geoindicadores son herramientas teórico-metodológicas para el diagnóstico ambiental, que permiten interpretar información compleja y dispersa sobre el estado del medio ambiente, y transformarla en información utilizable para la toma de decisiones. Su aplicación sobre unidades funcionalmente homogéneas hace más eficiente la identificación de problemas ambientales con expresión territorial y permite priorizar su atención.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Alexander David (1991), "Applied Geomorphology and the impact of Natural Hazards on the Built Environment", *Natural Hazards*. Kluwer Academic Publishers. Netherlands, 4: 57-80.
- ASERCA (1997), *Situación actual del Arroz Nacional*. En: Claridades Agropecuarias, México, D.F. 75 p.
- Baban, S.M.J. (1993), "Detecting water quality parameters in Norfolk Broadas, U.K., using Landsat imagery". *Int. J. Remote Sensing*, 14:247-267.
- Ball, M. M. (1967), "Carbonate sand bodies of Florida and the Bahamas" *Journal of Sedimentary Petrology*, 37 (2):556-591.
- Bankes, S. (1993), Exploratory modeling for policy analysis. *Operations Research* 41: 435-449.
- Baudry J. (1984), Effects of landscape structures on biological communities: the case of hedgerow network landscapes. In: Brandt J. and Agger P. (eds.) *Methodologies in landscape ecological research and planning*. Vol I. Proceedings of the First International Seminar of the International Association of Landscape Ecology. Roskilde. Denmark. October 15-19. pp. 55-65.
- Bautista, F., G. Palacio-Aponte, M. Ortiz-Pérez, E. Batllori-Sampedro y M. Castillo-González, 2005. El origen y el manejo maya de las geoformas, suelos y aguas en la Península de Yucatán, p. 21- 32. En: F. Bautista y G. Palacio (Eds.) *Caracterización y Manejo de los Suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones Agropecuarias, Forestales y Ambientales*. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, Instituto Nacional de Ecología. 282 p.
- Berger, A.R. & W.J. Iams Eds. (1996), *Geoindicators: assessing rapid environmental change in earth systems*. Rotterdam: A. A. Balkema, 466 p.

- Bertrand, G. 1968. Paysage et géographie physique globale. *Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, 39 (3): 249-272.
- Bijlsma, L., Ehler, C.N., Klein, R.J.T., Kulshrestha, S.M., McLean, R.F., Mimura, N., Nicholls, R.J., Nurse, L.A., Pérez Nieto, H., Stakhiv, E.Z., Turner, R.K. and Warrick, R.A. (1996), Coastal Zones and Small Islands, In Watson, R.T., Zinyowera, M.C. and Moss, R.H. (eds.) *Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses—Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 289-324.
- Boggs, Sam Jr. (1995), *Principles of sedimentology and stratigraphy*. Prentice Hall. New Jersey, USA. 726 p.
- Boose, E.R., Foster & Floret (1994), "Hurricane Impacts to Tropical and Temperate Forest Landscape". *Ecol Monographs* 64(4): 369-400.
- Breugel, P. van (1994), *Beyond Andrew: a Survey to the Impact of Hurricane Andrew on the South Florida Hammocks*. Tesis de maestría, Universidad Wageningen. 55 p.
- Brown, A.C. and McLachlan (1990), *Ecology of Sandy Shores*, Elsevier, Holland, pp. 5-39.
- Brown, B.E. (1997), *Integrated Coastal Management: South Asia*. DFID, UK, 212 p.
- Burel François y Baudry Jacques (2002), *Ecología del Paisaje. Conceptos, métodos y aplicaciones*, Traducción al español por Susana Suárez. Ediciones Mundi-prensa, Madrid, España, 353 p.
- Burrough, P. A. (1986), *Principles of Geographic Information Systems for Land Resources Assesment*. Monographs on soils and resources survey No. 12, Calrendon press,Oxford, 333p.
- Burrough P.A and McDonnell R.A. (1998), *Principles of Geographical Information Systems*, Oxford University Press, Great Britain, 333 p.
- Calvo García-Tornel, Francisco (1984), La Geografía de los Riesgos. *Geocrítica* 54. Noviembre. Universidad de Barcelona. Barcelona, España. 39 p.
- Carranza-Edwards, A., M. Gutiérrez-Estrada y R. Rodríguez-Torres (1975), An. Centro Cienc. Del Mar Y Limnol. Univ. Nal. Autón. México. Unidades Morfotectónicas Continentales de las Costas Mexicanas. 81-88.2 (1).
- Chauvet, P., (1994), "Aide-Memoire de Géostatistique Minière", *École des Mines de Paris*, 210 p.
- Chiappy Carlos (1996), *Modificaciones Ecológico-Paisajísticas; perspectivas en el planeamiento territorial y la preservación de la Biodiversidad*. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 132 p.
- Christian, C. S. and Stewart, G.A. (1964), *Methodology of Integrated Surveys*. In: UNESCO, *Aerial Surveys and Integrated Surveys*, Paris.
- Chuvieco, Emilio (1990), *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Ediciones Rialp, S. A. Madrid, España. 453p.

- Cooke R.U., Doornkamp J.C. (1990), "Coastal environments", *Geomorphology in environmental management*, Clarendon Press, Oxford, pp. 269-302.
- Cooper J.A.G., A.E.L. Ramm & T. D. Harrison (1994), The Estuarine Index: A New Approach to Scientific Information Transfer. *Ocean & Coastal Management*, 25:103-141.
- Corlay Jean-Pierre (1993), "Coastal Wetlands: A Geographical Analysis and some Projects for Management", *Ocean & Coastal Management*, 19:17-36.
- Cowardin L. M., Carter V., Golet F. C., and Lahore E. T., (1979), Classification of Wetlands and Deepwater Habitats of the United States.U.S.. Department of the Interior Fish and Wildlife Service. Office of Biological Services, Washington, D.C., 45 p.
- Crist, E.P. y R.C. Cicone (1984), A physically-based transformation of Thematic Mapper data the TM tasseled cap. IEEE Transactions on Geoscience and a Remote Sensing.Vol. G.E.-22, pp. 256-263.
- Dale H. Vi. y Beyeler C. S., (2001), "Challenges in development and use of ecological indicators", *Ecological Indicators* 1:3-10.
- Davies, J.H. (1964), A morphogenetic approach to world shorelines. *Z. Geomorphol.*, 8:127-142.
- De Gennes, P.G (1990), Continu et discontinue: l'exemple de la percolation. En Symposium: les enjeux. Encyclopedia Universalis, París, 8:127:142.
- Díaz Hernández Gabriel, (2001), "Análisis de vulnerabilidad por presencia de huracanes en el litoral de la Península de Yucatán". Tesis de maestría en ingeniería hidráulica. División de estudios de posgrado. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F. 100p.
- Dillon W., Goldstein M. (1984), *Multivariate Analysis: Methods and Applications*. John Wiley & Sons.,587 p.
- Doyle W. T., T. J. Smith III, and M. B. Robblee (1995), "Wind Damage of Hurricane Andrew on Mangrove Communities Along Southwest Coast of Florida, USA.", *Journal of Coastal Research*, Fort Lauderdale, Florida, Vol. 21 :159-168.
- Drew, D. (1986), Procesos interativos Homem-Meio Ambiente, Diffel S. A., Sao Pablo,206 p.
- Drdos, J. (1992), On the carrying capacity of environment. *Geografía y Desarrollo*, 3(7): 19-24.
- Dunbar, J.B., L.D. Britsch y E.B. Kemp III (1992), *Land Loss Rates: Report 3, Louisiana Coastal Plain*. Technical Report.# GL-90-2. USACE- New Orleans District. 28 p.
- Etter, A. (1991), *Introducción a la ecología del paisaje. Un marco de integración para los levantamientos rurales*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, Colombia. 83 p.
- Farina, A. (1998), *Principles and Methods in Landscape Ecology*. Chapman & Hall. 235 p.

- Fernández Escalante, A.E., García, M. Y Villarroya, F. (2005), "Proposal For A System Of Environmental Indicators To Monitor And Control Artificial Aquifers Recharge Operations Based On Case Studies". Ismar 5 Proceedings. 5th International Symposium On Management Of Aquifer Recharge. Berlin, 2005 (12-16 June), 29 p.
- Forman R.T.T y Grodon M. (1986), *Landscape Ecology*. Jonh Wiley & Sons, U.S.A. 619 p.
- Forman R.T.T. (1995), *Land mosaics. The ecology of Landscape and regions*. Cambridge University Press. USA. 632 p.
- Fortin, M.-J., Olson, R.J., Ferson S., Iverson L., Hunsaker C., Edwards G., Levine D., Butera, K., Klemans V. (2000), "Issues relates to the detection boundaries", *Landscape ecology*, Kluwer Academic Publishers, 15:453-466.
- Galletti, H. (2002), "Economía Forestal, Deforestación y Libre Comercio en el Sureste de México", En: CESPEDES. Deforestación en México, Causas Económicas; Incidencia del Comercio Internacional, 29-44 pp.
- Good, B. (1993) Louisiana's wetlands: combatting erosion and revitalizing native ecosystems. *Restoration and Management Notes*. 11:125-133.
- Green, D.G. (1994), Connectivity and complexity in landscapes and ecosystems. *Pacific Conservation Biology*, (in press).
- Gutiérrez de MacGregor M. T. y González Sánchez J. (1999), "Las costas mexicanas y su crecimiento urbano", *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 40:110-126.
- Hansen A., (1984), Landslide hazard analysis. In: Brunsten D., and Prior D.B. (Editors), *Slope instability*, Wiley, New York, pp. 523-602.
- Hasse, G. (1986), Theoretical and methodological foundations of landscape ecology. Institute of Geography and Geoecology, GDR Academy of Science, Leipzig, pp. 4-7.
- Hayes, M.O. (1975), Morphology of sands accumulations in estuaries. In: L.E. Cronin (Editor), *Estuarine Research*, Vol. 2. Academic Press, New York, pp. 2-22.
- Hobbs, R. (1997), Future landscapes and the future of landscape ecology. *Landscape and Urban Planning* 37:1-9.
- Holland, M. M. Compiler, (1988), SCOPE/MAB Technical consultations on landscape boundaries. Report of a SCOPE/MAB workshop on ecotones. *Biology International, Special Issue* 17: 47-106.
- Hope Jonh R. Tropical Coordinator (1996), "1995 Hurricane Season". The Weather Channel.
- Hjulstrom, F. (1939), Transportation of detritus by moving water. In: P.D. (ed.). *Recent Marine Sediments*. Tulsa, American Association of Petroleum Geologists: 5-31.
- Ibarra Obando. Silvia E., (1998), Cambio global y zona costera: una oportunidad para México. *Ciencia*. Marzo: 5-14.
- INEGI (1980a), Carta Edafológica, E15-6. Escala 1:250,000.
- INEGI (1988), Modelo digital del terreno, E15-6. Escala 1:50,000

- INEGI (2003), Anuario de estadísticas por entidad federativa. Temporalidad 1995-2002, 430 p.
- Jacquez G.M., Maruca S. y Fortin M.-J. (2000), "From fields to objects: A review of geographic boundary analysis" *Geographical systems, Springer-Verlag*, 2:221-241.
- Juanes, J.L. Ramírez E. y Medvediev, V.S. (1985), "Dinámica de los sedimentos en la playa de Hicacos, Cuba. Variaciones morfológicas del perfil de playa", *Revista Ciencias de la Tierra y el Espacio*, 10:69-84.
- Johnston CA, Bonde JP (1989), "Quantitative analysis of ecotones using a geographic information system". *Photogrametric Engineering and Remote Sensing*, 55:1643-1647.
- Kjerfve, B., K. E. Magill and J. E. Sneed (1988), Modeling of circulation and dispersion in Terminos Lagoon. Chap. 6: 111-138. In: Yáñez-Arancibia, A, and J. W. Day Jr. (Eds.) *Ecology of Coastal Ecosystems in Southern Gulf of México: The Terminos Lagoon Region*. Inst. Cienc. Del Mar y Limnol., UNAM, Coast. Ecol. Inst., LSU. Editorial Universitaria, México D.F., pp. 111-129.
- Lechat M.F. (1990), The international decade for natural disaster reduction: background and objectives. In: *Disasters, Great Britain*, Vol 14, Num 1. pp.1-6.
- Lewis, A.J., Q. Tao y D.H. Braud (1996), "Change Detection in Colour Presentation and Interpretation of Multi-Dimensional Image Data Sets." *Proceedings of the 17th Asian Conference on Remote Sensing*. Colombo, Sri Lanka. pp. E-7-1 - E-7-6.
- Louisiana Wetland Protection Panel (1987), *Saving Louisiana's coastal wetlands: The need for a long-term plan of action*. U.S. Environmental Protection Agency, EPA-230-02-87-026. 102 pp.
- Lot, H. A., Novelo, R. A. y Ramírez-García, P. (1986), *Angiospermas acuáticas mexicanas 1*. Volumen V. Listados Florísticos de México. Publicación del Instituto de Biología, UNAM. 70 p.
- Mateo, J. y Ortiz M.A. (2001), La degradación de los paisajes como concepción teórico-metodológica. Serie Varia, nueva época, No. 1. Instituto de Geografía, UNAM, México. 40 p.
- McBride A. R., Byrnes M. R., Hiland M.W. (1995), "Geomorphic response-type model for barrier coastlines: a regional perspective", *Marine Geology*, 126-1/4 : 143-159.
- Medvediev, V.S. (1982), "Particularidades morfo y litodinámicas de los litorales en las zonas tropicales", *Revista Problemas de Geomorfología, Litología y Litodinámica*, pp 33-46.
- Morgan B.W. (1968), *An introduction to Bayesian statistical decision process*. Prentice-Hall, New York, 116 p.
- Morton A. R., J.C. Gibeaut, J.G.Paine (1995), "Meso-scale transfer of sand during and after storms : implications for prediction of shoreline movement", *Marine Geology*, 126-1/4 : 161-179.
- Morton A. R. (2002a), "Coastal geoindicators of environmental change in the humid tropics", *Environmental Geology*, 42: 711-724.
- Morton A. R. (2002b), "Factors Controlling Storm Impacts on Coastal Barriers and Beaches-A preliminary Basis for Near Real-Time Forecasting", *Journal of Coastal Research*, 18:3:486-501.

- Naveh, Z. y A. S. Lieberman (1993), *Landscape ecology, Theory and Application*. Springer Verlag, New York, INC. USA, 360p.
- Naveh, Z. 1999. What is holistic landscape ecology? Abstract, 5th IALE-World Congress. Snowmass, CO, USA.
- Neef, E. (1983), Landscapes as the integration field of human regional work. *Geol. Mijnbouw* 62: 531–534.
- NOAA.Coastal Services Center (2003), Historical Hurricane Tracks. URL: <http://hurricane.csc.noaa.gov/hurricanes/index.htm>.
- Oldeman, R.A.A. (1990), *Forests: Elements of Silvology*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 624p.
- Palacio Aponte A.G. (1995), "Ensayo Metodológico Geosistémico para el Estudio de los Riesgos Naturales". Tesis de Maestría. División de estudios de posgrado. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 119 p.
- Palacio Aponte, A. G. (2001), "Detección de Cambios en la morfología litoral de Punta Zacatal y parte occidental de la Isla del Carmen, Campeche, mediante el análisis multitemporal de imágenes de satélite", *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, México*, (46):7-14.
- Perillo, G.M.E. (1995), *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*. *Developments in Sedimentology*. Editor G.M.E Perillo. Elsevier Science. pp 17-47.
- Phleger, F. B. y A. Ayala-Castañares (1971), *Am. Assoc. Petr. Geol. Bull.*, Processes and History of Términos Lagoon, México.2130-2140.55 (12)
- Pickett, S. T. A. y P. S. White, eds. (1985), *The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamic*. Academic Press, EE.UU., 472 p.
- Pilkey, O. H., and Davis, T. W. (1987), *An analysis of coastal recession models: North Carolina coast in Nummedal, D., Pilkey, O.,H., and Howard, J.D., eds., Sea-level Fluctuation and Coastal Evolution: SEPM (Society for Sedimentary Geology) Special Publication No. 41, Tulsa, Oklahoma, pp. 59-68.*
- Ramos-Miranda, J. (2000), *Biologie, Ecologie, Exploitation de la Crevette blanche Litopenaeus setiferus en Campeche, Mexique. Thèse de doctorat de l' Université de Bretagne Occidentales spécialité: Océanographie biologique, France. 298 p.*
- Ray, G.C. and Hayden, B.P. (1992), Coastal zone ecotones. In: A.J. Hansen & F. di Castri (Eds.). *Landscape boundaries*. Springer-Verlag.USA. 403-420 pp.
- Ray, G.C. (1991), Coastal-Zone Biodiversity Patterns. *BioScience* 41(7): 490-498 pp.
- Reineck, H.E. (1972), "Tidal Flats". In: *Recognition of Ancient Sedimentary Environments. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication* 16, 146–160 pp.
- Roggeri Henri (1995), *Tropical freshwater Wetlands*. Kluwer Academic Publishers, London. 364 p.
- Rossignol, M., Rossignol, L., Oldeman, R.A.A. & Tizroutine, S.B. (1998), *Struggle of Life or the Natural History of Stress and Adaptation*. The Netherlands by Grafisch. Service Centrum Van Gils bv, Wageningen.

- Roth C. Linda (1992), "Hurricanes and Mangrove Regeneration: Effects of Hurricane Joan, October 1988, on the Vegetation of Isla del Venado, Bluefields, Nicaragua", *Biotropica* 24(3): pp. 375-384.
- SAGARPA-CONAPESCA (2002), Anuario estadístico de pesca, México, D.F.
- Sasser, C.E., M.D. Dozier, J.G. Gosselink, and J.M. Hill (1986), "Spatial and temporal changes in Louisiana's Barataria Basin marshes, 1945-1980". *Environmental Management* 10:671-680.
- SEMARNAP, (2000). Inventario Nacional Forestal. Instituto de Geografía, UNAM, Hoja Z15-E15\_6f.
- Smaalen, Van J.W.N. 1996. Spatial abstraction based on hierarchical reclassification. *Cartographica*, 33(1): 64-72.
- Smith III Thomas, M. B. Robblee, H. R. Wanless y T. W. Doyle (1994) "Mangroves, Hurricanes, and Lightning Strikes", *BioScience*, 44 - 4 : 256- 262.
- Sochava, V.B., (1978), *Introducción al Estudio de los Geosistemas* (En ruso), Nauka, Novosibirsk, 318 p.
- Sorensen, J.C. and Kjerfve B.,(1990), COASTS Institutional Arrangement for Managing Coastal resources and Environments. 2a Ed., Coastal Publication N° 1. Research Planning Institute, Inc.,NPS-USDI and U.S. AID: 194 p.
- Thom, B. G., J., (1967), *Ecol., Mangrove Ecology and Deltaic Geomorphology: Tabasco, México*. 301-343.55
- Tischendorf L., (2001), "Can landscape indices predict ecological processes consistently? " *Landscape Ecology* 16:235-254.
- Toledo, A., A.V. Botello, F. Contreras, M. Herzig, S. Castillo y G. Binquíst, (1993), La zona costera del Pacífico Sur: un ecosistema amenazado. *Bol. Humedales Costeros de México* 1(3):8-16.
- Turner, R.E., and D. Cahoon, eds. (1988), Causes of wetlands loss in the coastal Gulf of Mexico. Vol 1. Executive summary. Minerals Management Service OCS Study/MMS 87-0119.
- Turner M. G. Gardner R. H. y O' Neill R. V.,(2001), *Landscape Ecology in Theory y Practice. Pattern and Process*, Springer-Verlag, New York. 401 p.
- Twilley, Robert R. (1999), "Properties of Mangrove Ecosystem related to the energy signature of coastal environments", *Biogeochemistry of Gulf of Mexico estuaries*. Editors: Thomas S. Bianchi, Jonathan R. Pennock, Robert R. Twilley. John Wiley New York, pp. 43-62.
- U.S. Bureau of Mines (1996), *Dictionary of Mining, Mineral, and Related Terms*. Second Edition. U.S. Department of the Interior. Hacettepe University Department of Mining Engineering. <http://www.maden.hacettepe.edu.tr/dmmrt/index.html>
- Van Smaalen, J.W.N. 1996. Spatial abstraction based on hierarchical reclassification. *Cartographica*, 33(1): 64-72.
- Velázquez Alejandro y Bocco Gerardo (2003), "La ecología del paisaje y su potencial para acciones de conservación de ecosistemas templados de montaña", *Conservación de Ecosistemas Templados de Montaña en México*. INE, México. 315 p.

- Verstappen Herman Th. (1992), "Requerimientos de la información temática en la concientización de amenazas naturales y la mitigación de riesgos", *1er Simposio internacional sobre sensores remotos y sistemas de información geográfica para el estudio de los riesgos naturales*. Bogotá, Colombia. 14 p.
- Vester H., N. Armijo, G. García, I. Olmsted, A. Pereira, V. Sorani (2000), Influencias de huracanes en el paisaje de Yucatán. Informe de trabajo al Banco Mundial, 200 p.
- Vinogradov, B.V. (1998), *Fundamentals of landscape ecology*, Moscow, 418p.
- Warrick, R.A., J. Oerlemans, P.L. Woodworth, M.F. Meier and C. le Provost (1996), "Changes in sea level" *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*, ed. J.T. Houghton, L.G. Meira Filho and B.A. Callander. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 359-405.
- Williams S. J., S. Penland y A. H. Sallenger Jr. (1991), "Geologic Controls on the Formation and Evolution of Quaternary Coastal Deposits of the Northern Gulf of Mexico". *Proceedings Coastal Sediments. Specialty Conference*. 25 al 27 de Junio. Seattle, WA.,USA.
- Windevoxhel N.J., Rodríguez J. J., Laman E. J. (1998), Situation of integrated coastal zone in Central America experiences of IUCN wetlands and coastal zone conservation program. *Ocean and Coastal Management Special Issue*. *Progress on Ocean and Coastal Management in Latin America*, 42:257-282.
- Yáñez-Arancibia A., Lara-Domínguez A.L., Sánchez-Gil P.y Álvarez Guillén H. (1988), Evaluación Ecológica de las Comunidades de Peces en la Laguna de Términos y la Sonda de Campeche,. In: Yáñez-Arancibia y J.W. Day Jr. (eds), 1988. *Ecología de los ecosistemas costeros en el sur del Golfo de México: La Región de la Laguna de Términos*. Inst. de Cienc. del Mar y Limnol. UNAM COSAT. Ecol. Inst. LSU. Editorial Universitaria, México D.F. ,Cap. 18: 323-356
- Zonneveld, Isaak S. (1995), *Land Ecology. And Introduction to Landscape Ecology as a base for Land Evaluation, Land Management and Conservation*. SPB Academic Publishing, Amsterdam.