

Aproximación metodológica para el cálculo de índices de sensibilidad costera ante erosión. Caso de aplicación: departamento de Bolívar, Caribe colombiano

Methodological approach for the calculation of coastal sensitivity indices to erosion. Application case: Bolívar Department, Colombian Caribbean

DOI: 10.26640/22159045.436

Fecha de recepción: 2018-01-29 / Fecha de aceptación: 2018-03-05

Johanna P. Echeverry H.* y Leonardo Marriaga R.**

Echeverry, J. y Marriaga, L. (2018). *Aproximación metodológica para el cálculo de índices de sensibilidad costera ante erosión. Caso de aplicación: departamento de Bolívar, Caribe colombiano.* Bol. Cient.CIOH (36):17-39. ISSN 0120-0542 e ISSN en línea 2215-9045 DOI: 10.26640/22159045.436

RESUMEN

Esta investigación presenta una propuesta metodológica basada en análisis espacial multicriterio, mediante la cual se identifiquen las áreas costeras del departamento de Bolívar más susceptibles, y así mismo, las más resistentes ante la acción erosiva del oleaje, que sirvan a futuro para generar bases técnicas sólidas con miras a la elaboración de recomendaciones científicas y propuestas de esquemas de manejo del riesgo. Los criterios utilizados como base del análisis fueron la geomorfología, la cobertura de la tierra y los patrones de oleaje en aproximación al área de estudio, sobre los cuales se aplicó la técnica Analytical Hierarchy Process para la ponderación y asignación de pesos y finalmente mediante herramientas de Sistema de Información Geográfica, se realizó una superposición ponderada de resolución de problemas multicriterio. Los resultados espaciales obtenidos fueron satisfactorios, en cuanto a la ubicación de las zonas más sensibles del litoral. Sin embargo, evidenció la necesidad de contar con fuentes de información primaria con estándares específicos de acuerdo con el objetivo del estudio a realizar.

PALABRAS CLAVE: análisis espacial multicriterio, geomorfología, ecosistemas, oleaje, costas, sistemas de información geográfica.

ABSTRACT

This investigation presents a methodological proposal, based on multicriteria spatial analysis, which identifies Bolivar Department coastal areas most susceptible, and likewise the resistant ones to threats of marine origin, to improve solid basis and for the development of scientific recommendations and proposed risk management schemes. The criteria used as the basis of the analysis were geomorphology, land cover and wave climate near to the study area, on which the Analytical Hierarchy Process technique were applied for weighting the variables and finally using Geographic Information System tools, a weighted superposition of multi-criteria decision problems was performed. Spatial results were satisfactory, as the location of the most sensitive areas of the coast. However, it showed the need for primary information sources specific standards according to the objective of the study to be performed.

KEYWORDS: *Spatial multi-criteria analysis, geomorphology, ecosystems, surf, coast, Geographic Information Systems.*

* Grupo de Investigación Zona Costera (Subdirección de Desarrollo Marítimo - Dirección General Marítima). Correo: pecheverry@dimar.mil.co

** Grupo de Investigación en Oceanología (Escuela Naval de Cadetes Almirante Padilla - Armada Nacional). Correo: leonardo.marriaga@armada.mil.co

INTRODUCCIÓN

Para la comunidad científica es un hecho que el clima global se está viendo alterado de manera alarmante, como resultado del aumento de concentraciones de gases invernadero, tales como dióxido de carbono, metano, óxidos nitrosos y clorofluorocarbonos (CFC`S), que junto con causas de origen natural, aceleran el llamado cambio climático, presentando desafíos únicos para las áreas urbanas y su creciente población: días y noches más calurosos o menos fríos en la mayor parte de la tierra, aumento de la frecuencia de periodos calientes, de lluvias y de sequías en la mayor parte del planeta, aumento de actividad de ciclones, así como aumento del nivel del mar (ONU, 2011).

Por ser Colombia un país que cuenta con gran extensión de territorio litoral, existe la importancia de efectuar una evaluación de la sensibilidad de la línea de costa ante las amenazas de origen marino, en especial las asociadas con erosión costera, de acuerdo con las características fisiográficas del sector y al comportamiento de su mar adyacente en aras de evaluar la susceptibilidad ante sus efectos en sectores específicos del litoral, teniendo en cuenta las diferencias en el comportamiento de la dinámica marina en la zona costera, según las circunstancias propias de cada una.

Colombia cuenta con aproximadamente 2500 km de línea de costa sobre su litoral Caribe, donde se localiza parte importante de la población del país y se llevan a cabo vitales actividades socioeconómicas, turísticas y portuarias, que han generado una significativa inversión en infraestructura, especialmente en ciudades como Cartagena. Dicha infraestructura, además de la población y los ecosistemas allí presentes, podrían verse seriamente afectados por los impactos generados por el ascenso del nivel del mar, que junto con la acción del oleaje y la deriva litoral, originan erosión, produciendo pérdidas de terrenos y afectando la morfología litoral (Robertson, 2003).

Es importante para las zonas costeras del país, la aplicación de instrumentos que permitan prevenir y minimizar los efectos negativos de eventos de origen natural y/o antrópico a

través de estudios de vulnerabilidad y medidas de adaptabilidad para los efectos erosivos, realizando un seguimiento y evaluación de la incorporación de la gestión de riesgos dentro de los planes de ordenamiento territorial municipal; así mismo, en la asistencia técnica para el mejoramiento de implementación de acciones necesarias para la prevención y mitigación de riesgos.

En este sentido, la realización de estudios a escala regional de las zonas costeras cobra una mayor importancia en la medida que permiten la inclusión de los ecosistemas marinos y costeros dentro del análisis de causa-efectos, avanzando en su reconocimiento como parte integral y estratégica del territorio. El reto para las entidades competentes es lograr la caracterización y diagnóstico de las zonas costeras, sus potencialidades y amenazas, así como formular Planes de Manejo Integrado de Zonas Costeras (MIZC) articulados con los Planes de Desarrollo y Esquemas de Ordenamiento Territorial, siempre basados en estudios serios y profundos utilizando tecnología de punta disponible en el país como base de proyectos de investigación que consideren no solo los fenómenos de urbanización o desplazamientos rurales, los asentamientos en zonas de riesgo e invasiones del espacio público, sino también su interacción con eventos naturales a los que están expuestos.

ÁREA DE ESTUDIO

El departamento de Bolívar es el más extenso de los ocho que integran la costa Caribe colombiana; con un área de 2.5975 km² ocupa el 20 % del territorio continental de esta región y el 2.3 % del territorio nacional (Figura 1). Limita por el norte con el mar Caribe y con el Atlántico; por el sur con Antioquia; por el occidente con Sucre, Córdoba y Antioquia; y por el oriente con Santander, Cesar y Magdalena. Bolívar cuenta en el mar Caribe con territorio insular conformado por las islas de Tierra Bomba, Barú, islas del Rosario, Isla Fuerte e islas de San Bernardo. En su capital, Cartagena de Indias se encuentra la sede del Gobierno departamental y de casi todas las sedes regionales y seccionales de las entidades del Gobierno nacional (Gobernación Departamento de Bolívar, 2012).



Figura 1. Localización general departamento de Bolívar.



Figura 2. Área de estudio: zona costera del departamento de Bolívar (en color naranja).

Los límites departamentales en su zona costera se encuentran entre los puntos geográficos de Salinas de Galerazamba, municipio de Santa Catalina al norte y Boca Flamenquito al sur. Su litoral lo conforman los corregimientos de Galerazamba, Arroyo Grande, Punta Canoas, Arroyo de Piedra, Pontezuela, Bayunca, La Boquilla, Tierra bomba, Caño del Oro, Bocachica, Pasacaballos, Ararca, Santa Ana, Barú, Recreo y Leticia, e incluye como áreas geográficas importantes la Ciénaga de la Virgen o de Tesca, la Bahía de Cartagena, la Bahía de Barbacoas, y las Islas del Rosario (Figura 2).

Comparación histórica de línea de costa

Es posible evaluar preliminarmente los cambios erosivos y/o acumulativos que ocurren en el litoral del departamento a través de un análisis de la evolución de la línea costera mediante la aplicación de metodologías que permiten analizar su evolución espacio-temporal. Con el uso de fotografías aéreas y con ayuda de los métodos fotogramétricos asociados que permiten efectuar comparaciones

cuantitativas y cualitativas, es posible hacer una identificación de la evolución de línea de costa en diferentes años y tomar esto como base para iniciar un diagnóstico de las posibles causas asociadas a estos cambios. Es decir, esta comparación, por sí sola, no suministra información definitiva ni de detalle respecto a las causas de los procesos de acreción-erosión sobre el borde costero.

El análisis de la posición de líneas de costa, definida esta como el límite tierra agua observado en la fotografía aérea, se realizó con el fin de establecer las condiciones iniciales en un año específico del cual se tiene disponibilidad de imágenes aéreas antiguas capturadas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). En la (Tabla 1) se encuentra la información de las fotografías aéreas disponibles. Las imágenes de mayor cobertura corresponden al vuelo C-987 de 1961, y dado que son las de mayor antigüedad y que cubren la mayor parte del área de estudio, son las utilizadas para el siguiente análisis (Figura 3).

Tabla 1. Fotografías aéreas de IGAC utilizadas para la fotointerpretación.

Vuelo	Año	Escala	Fotografía	Sector
C-794	1956	1:5000	101,103,111,931,951,971,991	Castillogrande
C-987	1961	1:20000	139,106,107,108,11,12,13,138,14,140,141,142,15,153,155,156,16,276,277,282,283,284,285,286,287,288	Punta Canoas, Boquilla, Cartagena urbano, Mamonal, Isla Barú
R-611	1968	1:18000	213, 217, 175	Crespo, Los Morros
C-1483	1974	1:10000	124,125,126,127,129,130,131,132,133	Isla Barú
C-1845	1978	1:58000	80, 811, 821	Isla Barú
C-2304	1987	1:27400	91,101, 131, ,141, 151, 161	Isla Barú

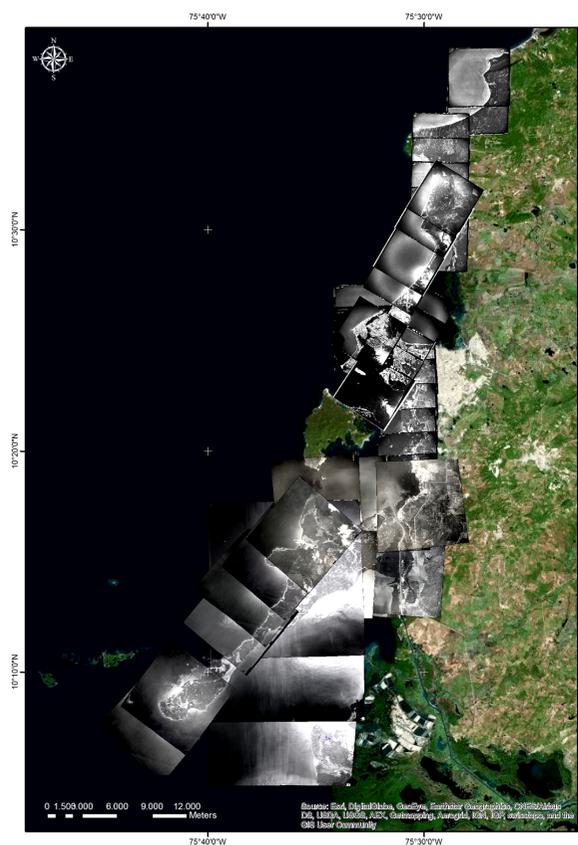


Figura 3. Cubrimiento de fotografías aéreas antiguas del IGAC en el departamento de Bolívar.

Al comparar las fotografías históricas con imágenes satelitales de años 2015 a 2016 disponibles en el basemap de ArcGis®, se puede establecer de manera preliminar la tendencia de cambios en la línea de costa del departamento de Bolívar, para así tener una aproximación inicial de cuáles son las zonas más susceptibles a presentar modificaciones, ya sea por la pérdida o la ganancia de terreno, y cuáles son las que presentan mayor intervención antrópica para prevenirlas o contenerlas.

Para empezar, la parte norte del departamento fue analizada mediante las fotografías del vuelo C-987 del año 1961 respecto a una imagen óptica del sensor Digital Globe del 16 de febrero de 2016, sobre la cual se digitalizó la línea de costa de color azul. En el periodo de 55 años, se presentó en el sector entre Punta de Piedra y Punta Canoas una acumulación de sedimentos de hasta 1 km (Figura 4).

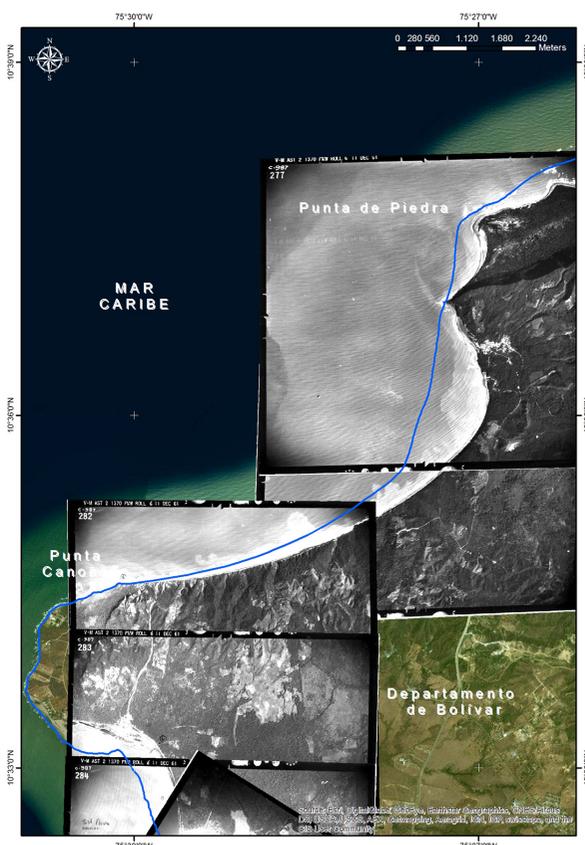


Figura 4. Cubrimiento de fotografías. Sector Punta de Piedra a Punta Canoas.

El siguiente segmento, comprendido entre Punta Canoas y La Boquilla fue analizado también mediante las fotografías del vuelo C-987 del año 1961 respecto a una imagen óptica del sensor Digital Globe del 04 de febrero de 2015 sobre la cual se digitalizó la línea de costa de color azul. En el periodo de 54 años, se presentó también acreción de aproximadamente 500 m en manzanillo del mar y de 200 m en La Boquilla (Figura 5).

La parte urbana de Cartagena de Indias conformada por la Ciudad Amurallada, Bocagrande, Castillogrande, El Laguito y Manga, también fue analizada con base en fotografías del vuelo C-987 del año 1961 respecto a una imagen óptica del sensor Digital Globe del 25 de enero de 2015, sobre la cual se digitalizó la línea de costa de color azul. En el periodo de 54 años, la línea de costa se mantuvo estable gracias a intervenciones antrópicas que se realizaron para

proteger los terrenos y las construcciones de la transgresión del mar en búsqueda de retomar su posición inicial. Por su parte, las islas de Manga y Manzanillo no presentan cambios en su línea de costa por encontrarse protegidas de la acción del oleaje debido al resguardo por la bahía interna de Cartagena. Además, es importante señalar que esta es la zona con el mayor grado de urbanización, ya que presenta la concentración de viviendas, hoteles, puertos, muelles y atractivos turísticos, por lo que se puede considerar el casco urbano de Cartagena de Indias como la zona del departamento más crítica a la hora de analizar riesgos por erosión costera (Figura 6).

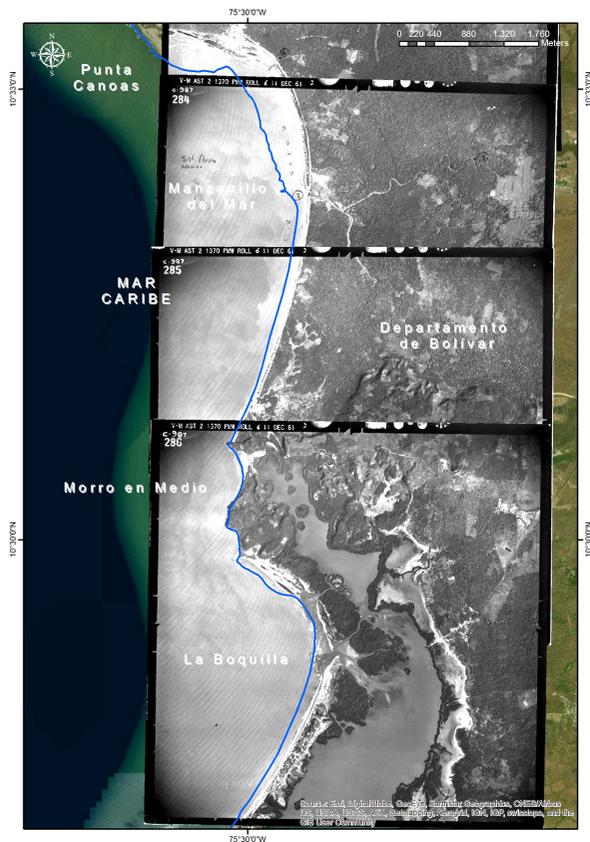


Figura 5. Cubrimiento de fotografías. Sector Punta Canoas a La Boquilla.

En cuanto a la zona conocida como Mamonal, se puede observar en la comparación entre las fotografías del vuelo C-987 año 1961 y la imagen óptica digital del sensor Digital Globe del 25 de enero de 2015, que ha presentado

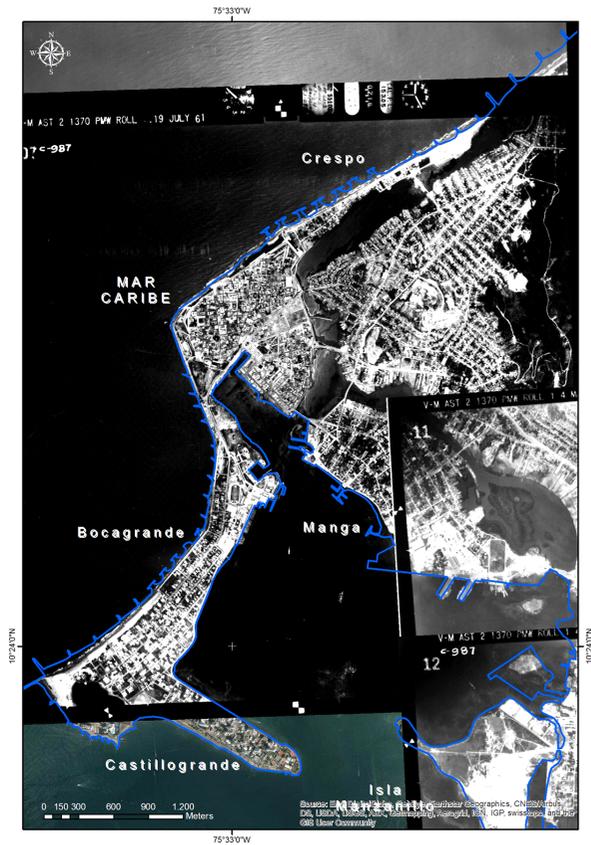


Figura 6. Cubrimiento de fotografías. Sector La Boquilla a Castillogrande, incluyendo las Islas de Manga y Manzanillo.

significativos cambios de ganancia de terreno al mar gracias a intervenciones antrópicas de relleno para construcción de instalaciones industriales. Gracias a estas sobrelevaciones del suelo y el hecho de encontrarse resguardada por la bahía de Cartagena, esta zona no presenta retrocesos de la línea costera (Figura 7).

Finalmente, la península de Barú, mejor conocida como Isla Barú pudo ser analizada con base en las fotografías del vuelo C-987 año 1961 respecto a la imagen óptica de Digital Globe del 3 de septiembre de 2016, encontrando estabilidad en la línea de costa dada su conformación geomorfológica, que de acuerdo con los resultados de un estudio adelantado por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe, corresponden a geformas altas dentro de las que se cuentan lomas y colinas, plataformas de abrasión y terrazas marinas (Figura 8).

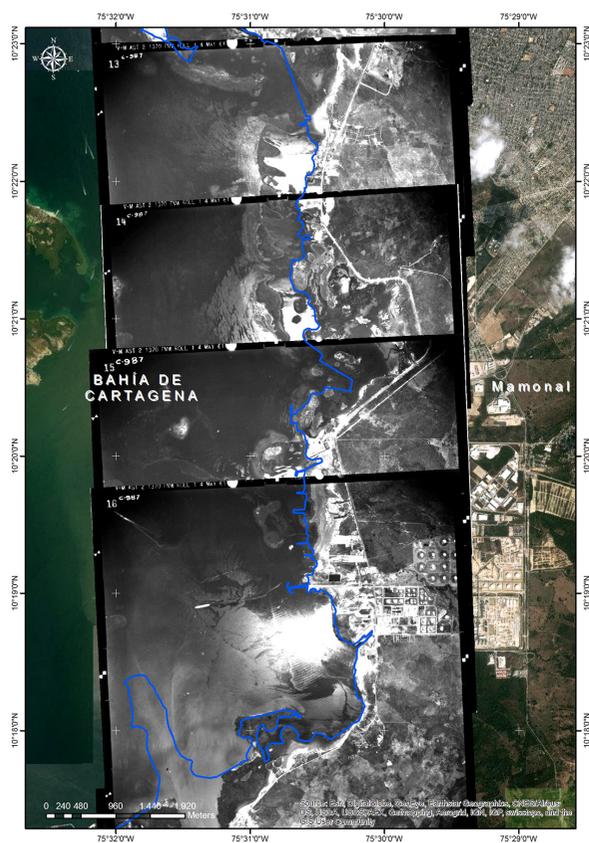


Figura 7. Cubrimiento de fotografías. Sector Isla Manzanillo a Desembocadura del canal del Dique.

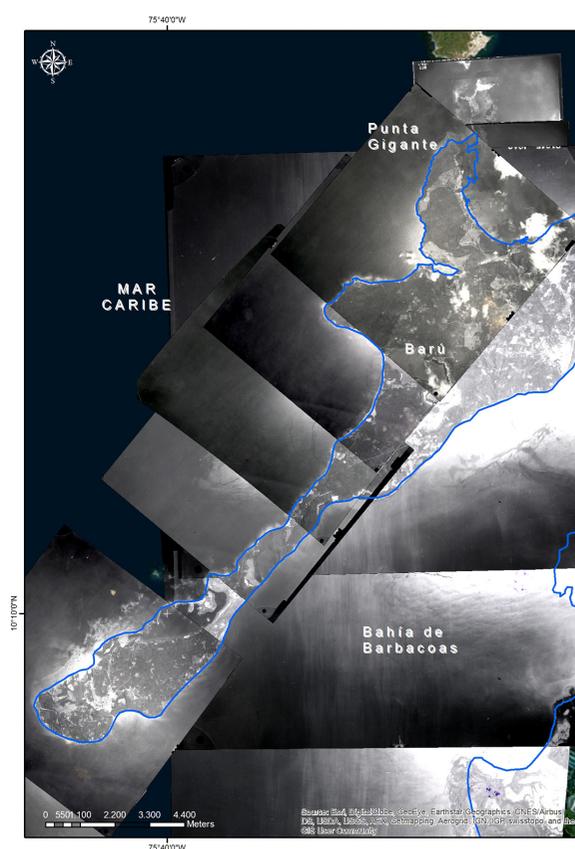


Figura 8. Cubrimiento de fotografías. Sector Isla Barú.

MATERIALES Y MÉTODOS

Es necesario tener en cuenta que los fenómenos marinos tienen manifestaciones locales diferentes a las estimaciones regionales y nacionales, pudiendo ser mayores o menores dependiendo de los procesos bio-geofísicos y socioeconómicos que allí se desarrollan. Las condiciones reales pueden ser diferentes ya que es posible que existan cambios no previstos en las variables utilizadas, además de otros factores que introducen diverso grado de incertidumbre (Petersen, 2002).

Para el desarrollo de la presente investigación se aplicó una adaptación de la metodología "Índice de Sensibilidad Medioambiental - ESI (Environmental Sensibility Index)" (Petersen, 2002), desarrollado como componente integral para la gestión ante la ocurrencia de derrames

de petróleo y sus planes de contingencia y respuesta desde 1979.

Los principales objetivos de la aplicación de la adaptación de esta metodología, son describir los elementos básicos de un sistema de mapeo de sensibilidad costera ante la erosión, partiendo de la recopilación y síntesis de los datos, hasta la definición de la estructura de datos utilizando tecnologías SIG para la elaboración de mapas con escenarios de sensibilidad costera, que servirán de base para la formulación futura de planes de acción en cada una de las zonas de interés, necesarios para la gestión de recursos naturales y ordenamiento territorial.

La Figura 9, a continuación, representa el proceso llevado a cabo para la obtención de los mapas de sensibilidad costera, cuyos detalles serán objeto de descripción más adelante.



Figura 9. Proceso metodológico para el desarrollo de los índices de sensibilidad costera.

Modelamiento multicriterio mediante la aplicación de SIG

El análisis espacial multicriterio es requerido en estudios de toma de decisiones, en los que existe más de un criterio a considerar, por lo que este tipo de análisis requiere de procedimientos sistemáticos que permiten dar soluciones a problemas complejos. De acuerdo con (Varela, 2005), la estrategia básica consiste en dividir el problema en partes pequeñas bien definidas, analizar cada parte e integrar de manera lógica todos los fragmentos para obtener una solución significativa.

Analytical Hierarchy Process

Para la ponderación de las variables a tener en cuenta en el presente estudio, se aplicó una evaluación multicriterio, definida como un conjunto de operaciones para la adopción de decisiones, considerando simultáneamente varios criterios o condicionantes. Para esto se aplicó la técnica "AHP" (Analytical Hierarchy Process), creada por Saaty (2000) como herramienta de apoyo a la toma de decisiones y como herramienta de pronóstico.

El análisis de decisión multicriterio basado en Sistemas de Información Geográfica es un proceso que integra y transforma datos geográficos y juicios de valor para obtener la evaluación total

de las alternativas de decisión, en donde para la toma de decisiones se deben tener en cuenta al menos dos elementos: uno que define acción, es decir, ¿qué? y otro que enmarca la localización, o sea, ¿dónde?, caracterizado por las siguientes ventajas (Franco, 2001, P. 18):

- Permite una clasificación detallada de la información objetiva que favorece el conocimiento del problema o situación en estudio y por ende la clasificación final de las alternativas. Esto ayuda a reevaluar los valores de los criterios inicialmente tomados, asimismo, el problema queda centrado por una serie de criterios e indicadores conocidos por los encargados de tomar las decisiones.
- Colabora de forma práctica y coherente en el manejo de los distintos enfoques frente a un mismo problema o situación. Esto se refiere a los diferentes puntos de vista a partir de los cuales se analiza el problema.
- Ofrece resultados basados siempre en el punto de vista que tenga el ente desarrollador y tomador de decisiones, permitiendo al mismo tiempo la posibilidad de contrastar varios puntos de vista para la solución de problemas espaciales, o bien, generando soluciones que integren varias posiciones en una sola solución de manera coherente.

La mencionada técnica usa la siguiente escala, basada en el principio de comparación por pares, así (Figura 10):

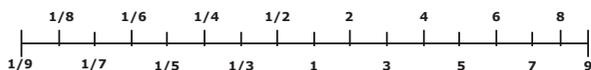


Figura 10. Escala de comparación por pares del *Analytical Hierarchy Process*.

Esta escala la establece una escala de nueve (9) elementos correspondientes a los distintos grados o niveles en los cuales se puede discriminar la intensidad de la relación entre elementos de un conjunto dado, garantizando así, que todas las comparaciones y mediciones, se hacían en la misma escala, ya que considerando la diversidad de las variables de estudio, es necesario realizar mediciones homogenizadas. El significado de cada valor de la escala se muestra a continuación (Tabla 2):

Tabla 2. Comparación de pares en la técnica AHP para los casos en los que el primer elemento es más sensible o intenso que el segundo elemento.

Sensibilidad	Intensidad	Significado
1	Igual o diferente a...	Al comparar un elemento con otro, hay indiferencia entre ellos.
3	Ligeramente más sensible/intenso	Al comparar un elemento con el otro, el primero es ligeramente más sensible/intenso que el segundo.
5	Más sensible/intenso que...	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera más sensible/intenso que el segundo.
7	Mucho más sensible/intenso que...	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera mucho más sensible/intenso que el segundo.
9	Absolutamente o muchísimo más sensible/intenso que...	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera absolutamente o muchísimo más sensible/intenso que el segundo.

Los valores pares (2, 4, 6 y 8) se utilizan cuando al comparar dos elementos entre sí, el primero está en un grado de sensibilidad (o intensidad en el caso del fenómeno oceanográfico) intermedio entre dos valores adyacentes de la escala.

Para el caso de los valores recíprocos de la escala, la interpretación es completamente análoga, esto se muestra en la Tabla 3:

Tabla 3. Comparación de pares en la técnica AHP para los casos en los que el primer elemento es menos sensible o intenso que el segundo elemento.

Sensibilidad	Intensidad	Significado
1/3	Ligeramente menos sensible/intenso que...	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera ligeramente menos sensible o intenso que el segundo.
1/5	Menos sensible/intenso que...	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera menos sensible/intenso que el segundo.
1/7	Mucho menos sensible/intenso que...	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera mucho menos sensible/intenso que el segundo.
1/9	Absolutamente o muchísimo menos sensible/intenso que...	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera absolutamente o muchísimo menos sensible/intenso que el segundo.

En este caso, los valores 1/2, 1/4, 1/6, y 1/8 se usan de la misma forma que 2, 4, 6 y 8.

Los resultados obtenidos luego de la aplicación de la metodología, permitirán la asignación de los pesos a cada componente del factor analizado, en el que se busca representar el grado relativo de sensibilidad ante amenazas de origen marino. Para esto se establecieron cuatro grados, así (Tabla 4):

Tabla 4. Grados de sensibilidad definidos para la línea costera.

Grado	Descripción
1	Extremadamente sensible
2	Muy sensible
3	Sensible
4	Poco sensible

Aplicación de encuesta

Para obtener los resultados aplicando la metodología propuesta, se realizó una encuesta a 10 expertos en las áreas del conocimiento relacionadas con litorales y oceanografía.

Así, considerando que el propósito es la aplicación del análisis multicriterio y establecer las áreas más sensibles a sufrir erosión, enfrentando diferentes clasificaciones de la zona costera y por tratarse de información espacial, el análisis de decisión multicriterio combinado con las herramientas y potencialidades de los sistemas de información, brinda una técnica cuyos resultados dependen de la configuración, tanto objetiva como subjetiva, por parte de los expertos, de los datos originales; convirtiendo datos multidimensionales en valores unidimensionales para la toma de decisiones, a través de la realización de una secuencia de actividades que comienzan con el reconocimiento del problema, continuando con la identificación de criterios y la evaluación de resultados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presenta la aplicación del modelamiento multicriterio al caso de estudio, en el que se busca establecer la sensibilidad costera ante la acción erosiva del oleaje, por lo

que se seleccionaron tres criterios básicos de evaluación: la geomorfología, la cobertura de la tierra (ecosistemas) y el ángulo de la línea costera respecto a la dirección del oleaje para los casos medio y extremo, obteniendo así los procedimientos y resultados que en adelante se describen.

Geomorfología

Con el fin de comenzar la aplicación de la metodología para el criterio de geomorfología, se crea una matriz de comparación (14x14), en donde los encabezados de las filas y las columnas, corresponden a las unidades geomorfológicas identificadas en el litoral del departamento, para de allí determinar pesos de sensibilidad atribuida a cada uno de los factores. El primer paso para rellenar la matriz, es asignar el valor uno (1) en la diagonal de la misma, y en la zona triangular superior se asignan valores de acuerdo con la escala Saaty (Varela, 2005). Por lógica, en la parte triangular inferior, se asignará a cada casilla el valor recíproco a su correspondiente en la zona triangular superior (Tabla 5).

Siendo:

- a. Barra litoral
- b. Cuerpo de agua
- c. Cuerpo de médanos
- d. Espiga
- e. Flecha litoral
- f. Zona de inundación
- g. Pantano de manglar
- h. Plano aluvial
- i. Playón antiguo
- j. Playa
- k. Salar
- l. Loma y colina
- m. Plataforma
- n. Terraza

Luego de poblar la matriz por parte de cada uno de los expertos, se realiza una sumatoria de los valores de cada columna.

Tabla 5. Pesos de sensibilidad atribuidos a la comparación de las unidades geomorfológicas. Ejemplo experto encuestado No. 1.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
A	1	7	5	3	3	7	9	5	7	3	3	9	9	9
B	1/7	1	1/5	1/7	1/7	1/7	1	5	7	1/7	1/3	9	9	9
C	1/5	5	1	1/5	1/5	1/7	5	7	7	1/5	1/3	9	9	9
D	1/3	7	5	1	3	5	5	5	7	3	3	9	9	9
E	1/3	7	5	1/3	1	5	5	5	7	3	3	9	9	9
F	1/3	7	7	1/5	1/5	1	3	3	7	1/5	1/5	9	9	9
G	1/9	1	1/5	1/5	1/5	1/3	1	1/3	7	1/5	1/5	9	9	9
H	1/5	1/5	1/7	1/5	1/5	1/3	3	1	5	1/7	1/5	9	9	9
I	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	5	1	1/9	1/9	7	7	7
J	1/3	7	5	1/3	1/3	5	5	7	9	1	3	9	9	9
K	1/3	3	3	1/3	1/3	5	5	5	9	1/3	1	9	9	9
L	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9	1/7	1/9	1/9	1	1/7	1/7
M	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9	1/7	1/9	1/9	7	1	3
N	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9	1/7	1/9	7	7	1/3	1
Total	3.80	45.68	32.02	6.42	9.09	29.43	42.48	48.67	73.43	11.66	21.60	112.0	98.48	101.14

A partir de los valores que se registraron en la matriz de comparación por pares, se determinó el vector de sensibilidad, compuesto por catorce componentes, donde cada uno representa el peso relativo (sensibilidad) de cada uno de las unidades geomorfológicas para cada uno de los resultados de los expertos.

Para esto se normalizó cada columna de la matriz, dividiendo el valor de cada casilla de

la matriz entre el total de la sumatoria de la columna a la cual pertenece. Luego, a partir de esta matriz normalizada por columna se obtuvo el vector de prioridad asociado; que en este caso particular, representará los pesos de cada uno de los factores considerados. El valor de cada uno de los componentes de este vector de prioridad se calculó mediante la media aritmética de los valores de cada fila de la matriz (Tabla 6).

Tabla 6. Resultado de vector prioridad para las unidades geomorfológicas, cuyos valores determinan el orden de las variables para su ponderación. Ejemplo experto encuestado No. 1.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Vector prioridad
A	0.263	0.153	0.156	0.467	0.330	0.238	0.212	0.103	0.095	0.257	0.158	0.080	0.091	0.089	0.191
B	0.038	0.022	0.006	0.022	0.016	0.005	0.024	0.103	0.095	0.012	0.018	0.080	0.091	0.089	0.044
C	0.053	0.109	0.031	0.031	0.022	0.005	0.118	0.144	0.095	0.017	0.018	0.080	0.091	0.089	0.064
D	0.088	0.153	0.156	0.156	0.330	0.170	0.118	0.103	0.095	0.257	0.158	0.080	0.091	0.089	0.145
E	0.088	0.153	0.156	0.052	0.110	0.170	0.118	0.103	0.095	0.257	0.158	0.080	0.091	0.089	0.122

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Vector prioridad
F	0.088	0.153	0.219	0.031	0.022	0.034	0.071	0.062	0.095	0.017	0.011	0.080	0.091	0.089	0.076
G	0.029	0.022	0.006	0.031	0.022	0.011	0.024	0.007	0.095	0.017	0.011	0.080	0.091	0.089	0.038
H	0.053	0.004	0.004	0.031	0.022	0.011	0.071	0.021	0.068	0.012	0.011	0.080	0.091	0.089	0.041
I	0.038	0.003	0.004	0.022	0.016	0.005	0.003	0.103	0.014	0.010	0.006	0.063	0.071	0.069	0.030
J	0.088	0.153	0.156	0.052	0.037	0.170	0.118	0.144	0.123	0.086	0.053	0.080	0.091	0.089	0.109
K	0.088	0.066	0.094	0.052	0.037	0.170	0.118	0.103	0.123	0.029	0.018	0.080	0.091	0.089	0.085
L	0.029	0.002	0.003	0.017	0.012	0.004	0.003	0.002	0.002	0.010	0.006	0.009	0.001	0.001	0.007
M	0.029	0.002	0.003	0.017	0.012	0.004	0.003	0.002	0.002	0.010	0.006	0.063	0.010	0.030	0.014
N	0.029	0.002	0.003	0.017	0.012	0.004	0.003	0.002	0.002	0.010	0.370	0.063	0.003	0.010	0.035

Con los valores de los vectores prioridad resultantes para cada unidad geomorfológica de cada uno de los expertos encuestados, se realizó

tratamiento estadístico con el fin de obtener un único valor a través de un promedio, obteniendo el siguiente resultado (Tabla 7):

Tabla 7. Resultado de tratamiento estadístico.

	Exp.1	Exp.2	Exp.3	Exp.4	Exp.5	Exp.6	Exp.7	Exp.8	Exp.9	Exp.10	Peso	Peso %
A. Barra litoral	0.191	0.059	0.137	0.224	0.031	0.097	0.174	0.097	0.140	0.136	0.129	12.874
B. Cuerpo de agua	0.044	0.034	0.044	0.009	0.195	0.041	0.010	0.041	0.024	0.044	0.049	4.875
C. Cuerpo de médanos	0.064	0.250	0.245	0.287	0.214	0.028	0.068	0.028	0.058	0.254	0.150	14.952
D. Espiga	0.145	0.078	0.067	0.135	0.201	0.109	0.089	0.109	0.205	0.067	0.120	12.047
E. Flecha litoral	0.122	0.078	0.067	0.135	0.105	0.109	0.038	0.109	0.215	0.067	0.104	10.429
F. Zona de inundación	0.076	0.216	0.344	0.016	0.213	0.029	0.312	0.029	0.066	0.344	0.165	16.464
G. Pantano de manglar	0.038	0.230	0.286	0.029	0.013	0.109	0.307	0.109	0.015	0.286	0.142	14.222
H. Plano aluvial	0.041	0.029	0.034	0.055	0.259	0.221	0.217	0.221	0.033	0.034	0.114	11.430
I. Playón antiguo	0.030	0.031	0.027	0.022	0.031	0.018	0.188	0.018	0.056	0.056	0.048	4.780
J. Playa	0.109	0.270	0.229	0.057	0.178	0.036	0.110	0.036	0.117	0.117	0.126	12.593
K. Salar	0.085	0.199	0.320	0.073	0.165	0.060	0.323	0.060	0.055	0.055	0.139	13.946
L. Loma y colina	0.007	0.008	0.008	0.034	0.017	0.007	0.030	0.007	0.007	0.007	0.013	1.331
M. Plataforma	0.014	0.018	0.016	0.043	0.023	0.269	0.020	0.269	0.022	0.022	0.072	7.163
N. Terraza	0.035	0.008	0.008	0.041	0.020	0.269	0.016	0.269	0.034	0.034	0.073	7.341

Dado lo anterior, se estableció que la ponderación de acuerdo con la sensibilidad costera en función de las unidades geomorfológicas presentes, es encabezada por la zona de inundación, el cuerpo de médanos, el pantano de manglar y salar, por ser consideradas como unidades geomorfológicas extremadamente sensibles ante agentes erosivos (Clasificación 1), seguido por las barras litorales,

playas, espigas, plano aluvial, flecha litoral y terraza con una ponderación de dos, por ser muy sensibles (Clasificación 2). Asimismo, se asignó ponderación de tres (Clasificación 3) por ser sensibles ante los agentes erosivos las plataformas y los cuerpos de agua y finalmente, el playón antiguo y las lomas quedaron en último lugar de ponderación (Clasificación 4) por ser poco sensibles (Tabla 8).

Tabla 8. Ponderación de las unidades geomorfológicas, clasificados en los cuatro rangos propuestos.

Ponderación	Unidad Geomorfológica	Peso %
1	Zona de inundación	16.464
2	Cuerpo de médanos	14.952
3	Pantano de manglar	14.222
4	Salar	13.946
5	Barra litoral	12.874
6	Playa	12.593
7	Espiga	12.047
8	Plano aluvial	11.430
9	Flecha litoral	10.429
10	Terraza	7.341
11	Plataforma	7.163
12	Cuerpo de agua	4.875
13	Playón antiguo	4.780
14	Loma y colina	1.331

Cobertura de la tierra

Ahora, aplicando la metodología anteriormente descrita a la variable de cobertura de la tierra, se asignaron los pesos correspondientes a áreas con

mayor sensibilidad a las zonas definidas como mayormente transformadas en donde la intervención del hombre ha causado desequilibrios en la dinámica costera, y la mínima a las áreas mayormente naturales, dada su resiliencia (Tablas 9 y 10).

Tabla 9. Pesos de sensibilidad atribuidos a la comparación de la cobertura de la tierra. Ejemplo experto encuestado No. 1.

	Mayormente transformadas	Agro-sistémicas	Mayormente naturales	Áreas húmedas y superficies de agua
Mayormente transformadas	1	7	7	7
Agrosistémicas	1/7	1	1/7	1/7
Mayormente naturales	1/7	7	1	5
Áreas húmedas y superficies de agua	1/7	7	1/5	1
Total	1.43	22.00	8.34	13.14

Tabla 10. Resultado de vector prioridad para la cobertura de la tierra, cuyos valores determinan el orden de las variables para su ponderación. Ejemplo experto encuestado No. 1.

	Mayormente transformadas	Agrosistémicas	Mayormente naturales	Áreas húmedas y superficies de agua	Vector de prioridad
Mayormente transformadas	0.70	0.32	0.84	0.53	0.60
Agrosistémicas	0.10	0.05	0.02	0.01	0.04
Mayormente naturales	0.10	0.32	0.12	0.38	0.23
Áreas húmedas y superficies de agua	0.10	0.32	0.02	0.08	0.13

Por lo anterior, las áreas mayormente transformadas, compuestas por el área urbana de Cartagena de Indias y otras áreas mayormente alteradas, representan el 54.31 % del peso total por ser las áreas más sensibles ante eventos erosivos (Clasificación 1). Las áreas agrosistémicas (Clasificación 2) y las mayormente naturales (Clasificación 3) dentro de las que se encuentran los bosques naturales,

vegetación secundaria, arbustales, herbazales, zonas desnudas como playas y afloramientos rocosos, tienen un peso de 26.96 % y 28.05 % respectivamente, clasificándolas como las siguientes áreas más sensibles. Por su parte, las áreas húmedas como los bosques de manglar se clasifican en cuarto lugar con un porcentaje de 10.78 % gracias a su resiliencia antes este tipo de eventos (Clasificación 4) (Tabla 11).

Tabla 11. Ponderación de la cobertura de la tierra, clasificados en los cuatro rangos propuestos.

Ponderación	Cobertura	Peso %
1	Mayormente transformadas	54.31
2	Agrosistémicas	26.96
3	Mayormente naturales	26.05
4	Áreas húmedas y superficies de agua	10.78

Régimen extremo de oleaje

Como se mencionó anteriormente, en la definición de estados de mar se tuvo en cuenta la agrupación de los datos de acuerdo con su dirección, además de la altura de ola significativa y su periodo, considerando que la dirección es fundamental debido a que la posición de la costa respecto al patrón predominante de las olas es determinante en su afectación, sufriendo una exposición menor al estar posicionada de forma angular a estos, que si estuviera en dirección paralela.

Para el caso del régimen extremo el criterio de selección de estados de mar se relacionó con la variable H_{s12} obtenida en el análisis de los patrones de oleaje, ya que esta variable representa la porción de las alturas de ola significativa que solamente son superadas 12 horas al año, similarmente al caso anterior se interrelacionó esta variable con las probabilidad de ocurrencia de las direcciones de los estados de mar, obteniendo las combinaciones que se muestran en la (Tabla 12).

Tabla 12. Probabilidad de ocurrencia de estados de mar en régimen extremo.

Dirección	Probabilidad	Hs	Tp	Hs ₁₂
NNE	0.6482	1.3380	5.0860	3.5880
N	0.1677	0.7974	4.2900	2.8090
W	0.0251	0.5471	3.6265	2.4301
WSW	0.0161	0.6176	3.4470	2.3530
NE	0.0091	0.6324	4.6640	2.2451

Es importante denotar que, dada la metodología utilizada para seleccionar los estados de mar, se tomaron en cuenta estados de mar provenientes de las direcciones NW y W, casos que son considerados atípicos, sin embargo por su naturaleza y su nivel energético, cuando ocurren pueden llegar a generar grandes afectaciones sobre el borde costero en un tiempo menor al producido por los casos del régimen medio.

Creación de mapas de índice de sensibilidad costera

Al analizar la sensibilidad a la amenaza de origen marino, se estableció cuál de los factores tiene más preponderancia en la afectación, aplicando la metodología AHP a los tres criterios analizados, así (tablas 13 a 15):

Tabla 13. Aplicación de la metodología para las tres variables analizadas. Pesos de los factores.

	Geomorfología	Cobertura de la tierra	Estado de mar del régimen medio y extremo del oleaje
Geomorfología	1	5	1/3
Cobertura de la tierra	1/5	1	1/7
Estado de mar del régimen medio y extremo del oleaje	2	5	1
Total	3.20	11.00	1.70

Tabla 14. Resultado de vector prioridad para los tres factores analizados, cuyos valores determinan el orden de las variables para su ponderación.

	Geomorfología	Cobertura de la tierra	Estado de mar del régimen medio y extremo del oleaje	Vector de prioridad
Geomorfología	1	5	1/3	0.35
Cobertura de la tierra	1/5	1	1/7	0.09
Estado de mar del régimen medio y extremo del oleaje	2	5	1	0.56

Tabla 15. Ponderación de las variables, clasificados en los rangos propuestos.

Ponderación	Factor	Peso %
1	Estado de Mar del régimen medio y extremo del oleaje	55.59
2	Geomorfología	35.37
3	Cobertura de la tierra	9.04

Luego de contar con las ponderaciones para cada uno de los criterios y la correspondiente total, se procedió a crear en ArcMap 10.5®, un modelo a través de la herramienta Model Builder, consistente en un lenguaje de programación

visual que se utiliza para crear, editar y administrar flujos de trabajo que encadenan secuencias de herramientas de geoprocésamiento y suministran la salida de una herramienta a otra herramienta como entrada (Esri, s.f) (Figura 11).

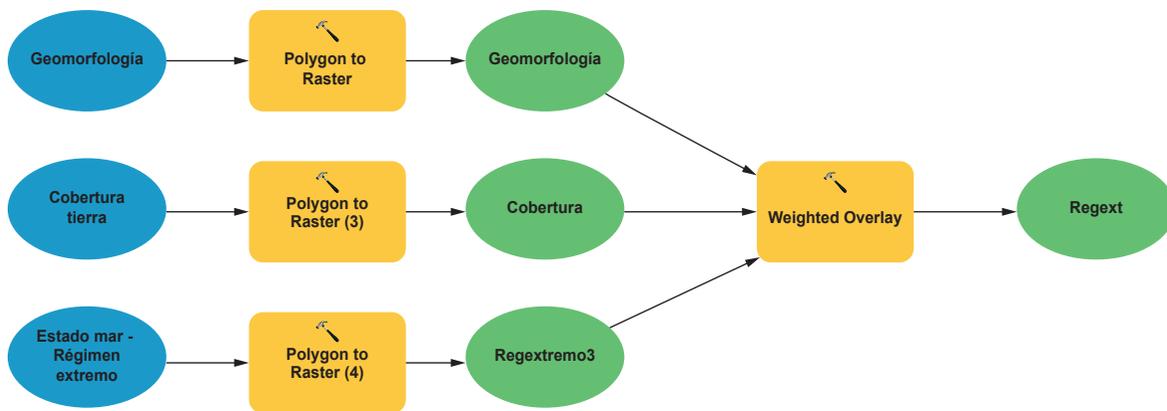


Figura 11. Diseño de Model Builder para análisis de pasos de las variables analizadas.

El modelo creado, contiene en su flujo de trabajo dos herramientas fundamentales:

Polygon to Raster. Convierte las entidades de polígono a *raster*, que en su forma más simple, consta de una matriz de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas en la que cada celda contiene un valor que representa información (Caja de herramientas de conversión, conjunto de herramientas a *raster*, s.f) (Figura 12).

En este sentido, a las capas vectoriales tipo polígono correspondientes a las unidades geomorfológicas, la cobertura de la tierra y la clasificación del litoral de acuerdo con sus ángulos para los regímenes medio y extremo, se aplicó la herramienta obteniendo como resultado tres capas tipo *raster*, sobre las cuales se aplicó el análisis descrito a continuación:

Las ventajas de almacenar los datos en forma de *raster* son las siguientes:

- Estructura de datos simple: matriz de celdas con valores que representan una coordenada y que, en ocasiones, se encuentra vinculada a una tabla de atributos.
- Formato potente para análisis espacial y estadístico avanzado.
- Capacidad de representar superficies continuas y llevar a cabo análisis de superficie.
- Capacidad de almacenar puntos, líneas, polígonos y superficies de manera uniforme
- Capacidad de llevar a cabo superposiciones rápidas con *datasets* complejos.

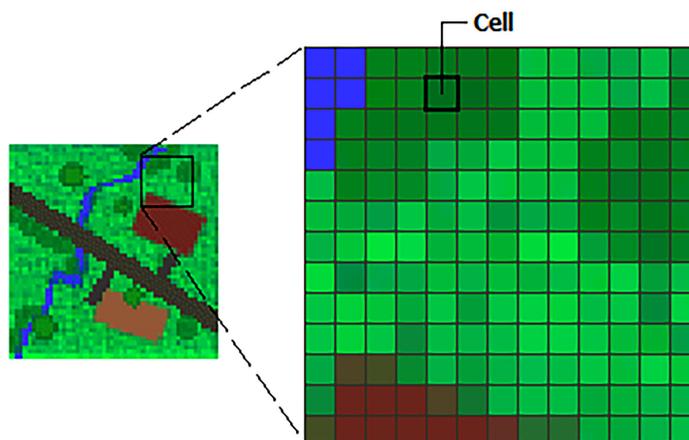


Figura 12. Representación de una estructura raster. Fuente: Saaty, 2000.

Weighted Overlay. La superposición ponderada es una herramienta que aplica uno de los métodos más usados para el análisis de superposición, para resolver problemas multicriterio como la selección del sitio y modelos de aptitud. En un análisis de superposición ponderada, cada uno de los pasos de análisis general de superposición se sigue cada uno de los pasos del análisis de superposición general (Caja de herramientas de Spatial Analyst, concepto conjunto de herramientas de superposición, s.f) (Figura 13).

Al igual que con todos los análisis de superposición, en el análisis de superposición ponderada, debe definir el problema, romper el modelo en submodelos, e identificar las capas de entrada.

Dado que las capas de criterios de entrada estarán en diferentes sistemas de numeración con diferentes rangos, para combinarlos en un solo análisis, cada célula de cada criterio debe ser reclasificado en una escala de preferencias comunes, tales como de 1 a 10, siendo 10 la más favorable.

Una preferencia asignado en la escala común implica la preferencia del fenómeno para el criterio. Los valores de preferencia son en una escala relativa. Es decir, una preferencia de 10 es dos veces tan preferida como una preferencia de 5.

Los valores de preferencia no solo deben ser asignados con relación a otro dentro de la capa, sino que deben tener el mismo significado entre otras capas. Por ejemplo, si se asigna una ubicación para un criterio de preferencia de 5, deberá tener la misma influencia sobre un segundo criterio.

Cada uno de los criterios en el análisis de superposición ponderada pueden no ser iguales en importancia (Figura 13). Puede ponderar los criterios importantes más que los otros criterios. Los criterios de entrada se multiplican por los pesos y suman.

El paso final del proceso de análisis de superposición es validar el modelo para asegurarse de que lo que indica el modelo está en un sitio realmente está allí.

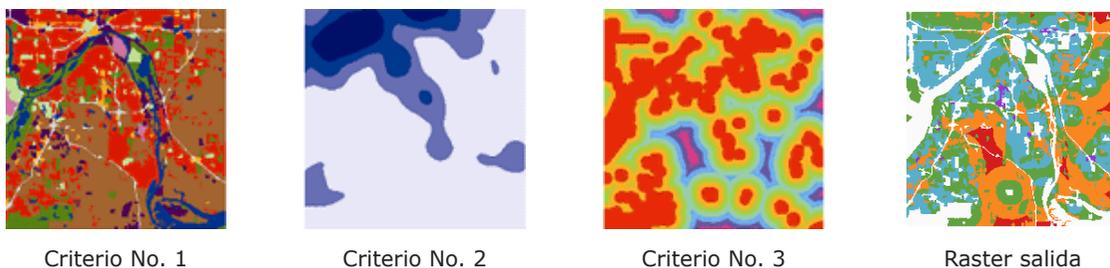


Figura 13. Representación del funcionamiento de la herramienta Weighted Overlay. Fuente: Modificado por el autor (Saaty, 2000).

Los siguientes mapas corresponden a los resultados de la aplicación del análisis para los regímenes medio y extremo del oleaje, en los

que se señalan las áreas clasificadas en cada uno de los cinco grados establecidos, encontrando los siguientes resultados (figuras 14 a 21).

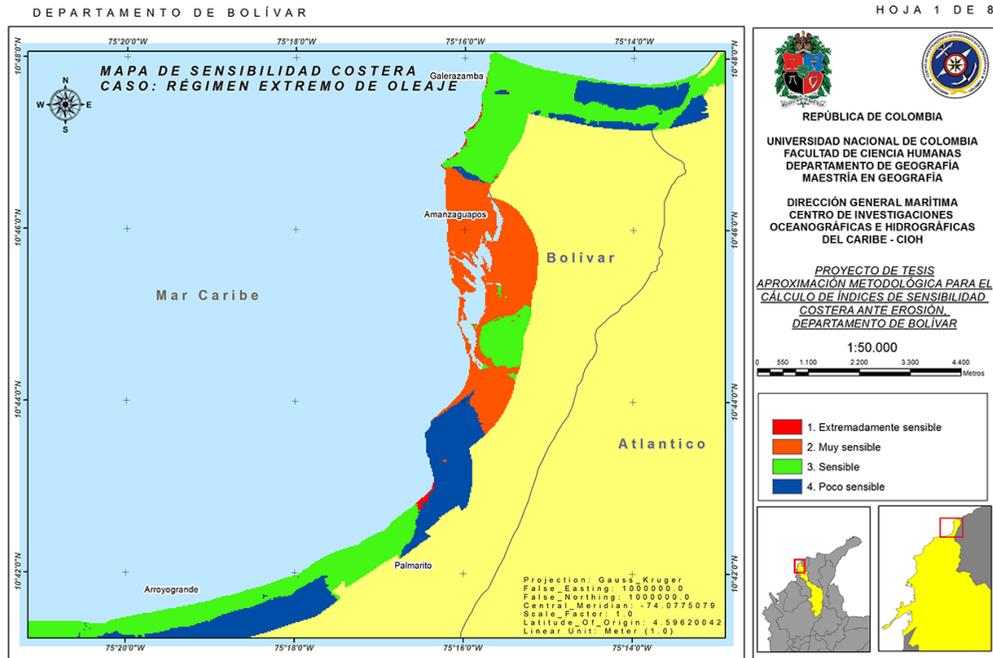


Figura 14. Mapa N° 1. Sensibilidad costera. Caso régimen extremo de oleaje.

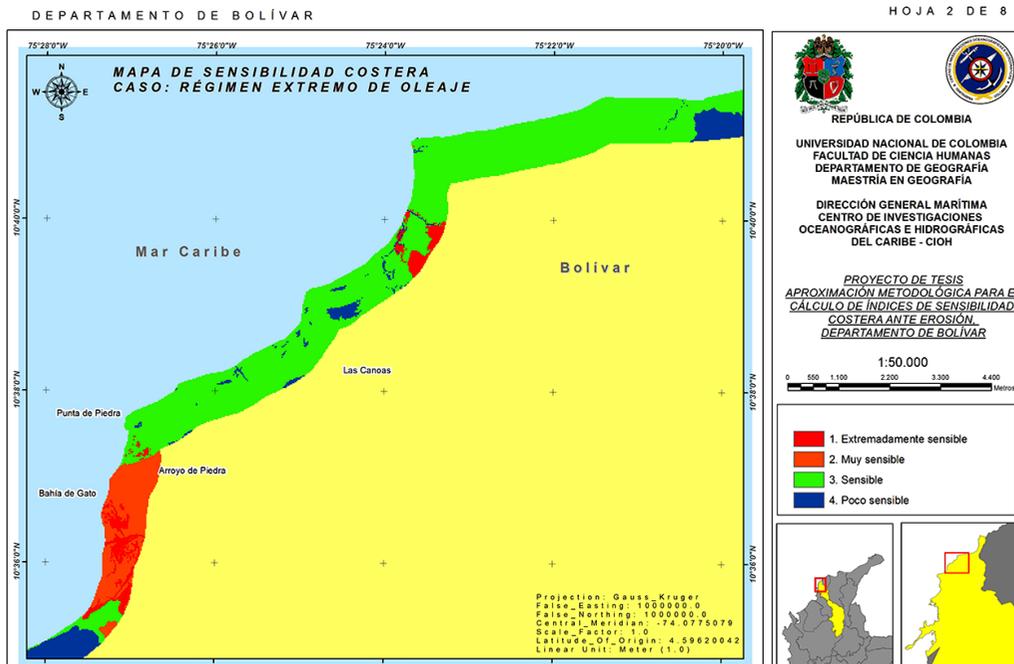


Figura 15. Mapa N° 2. Sensibilidad costera. Caso régimen extremo de oleaje.

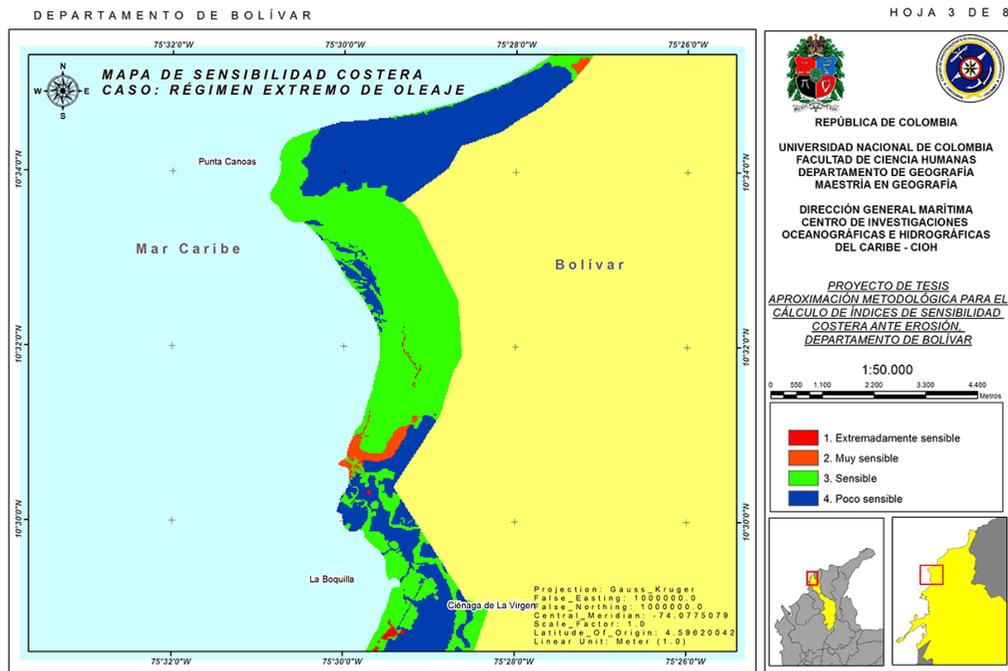


Figura 16. Mapa N° 3. Sensibilidad costera. Caso régimen extremo de oleaje.

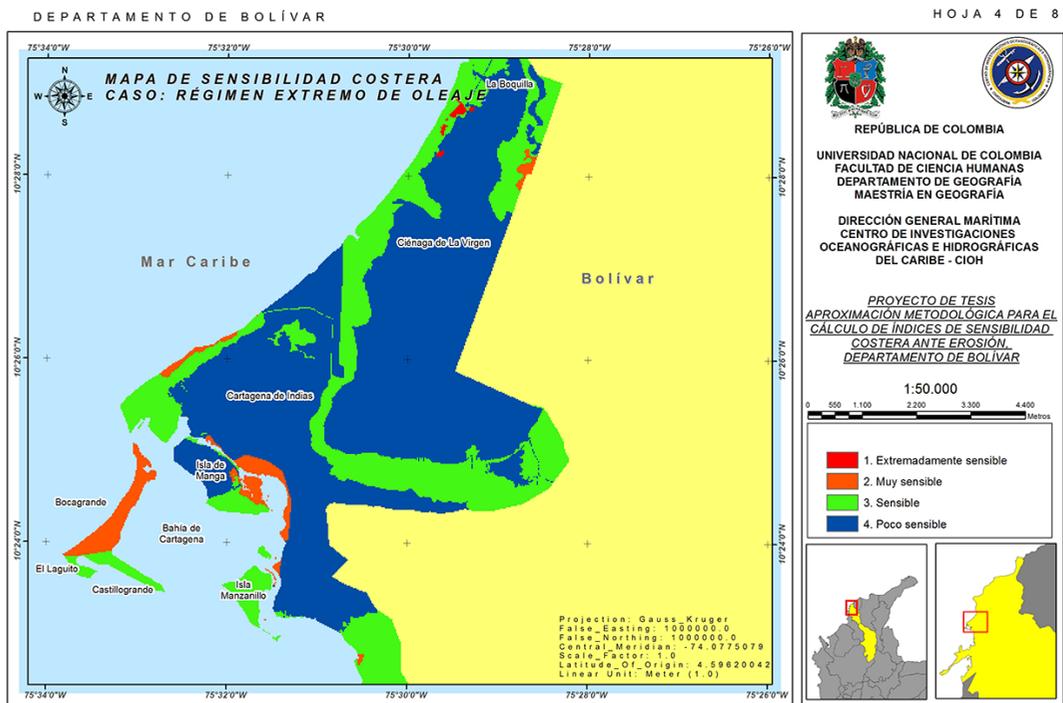


Figura 17. Mapa N° 4. Sensibilidad costera. Caso régimen extremo de oleaje.

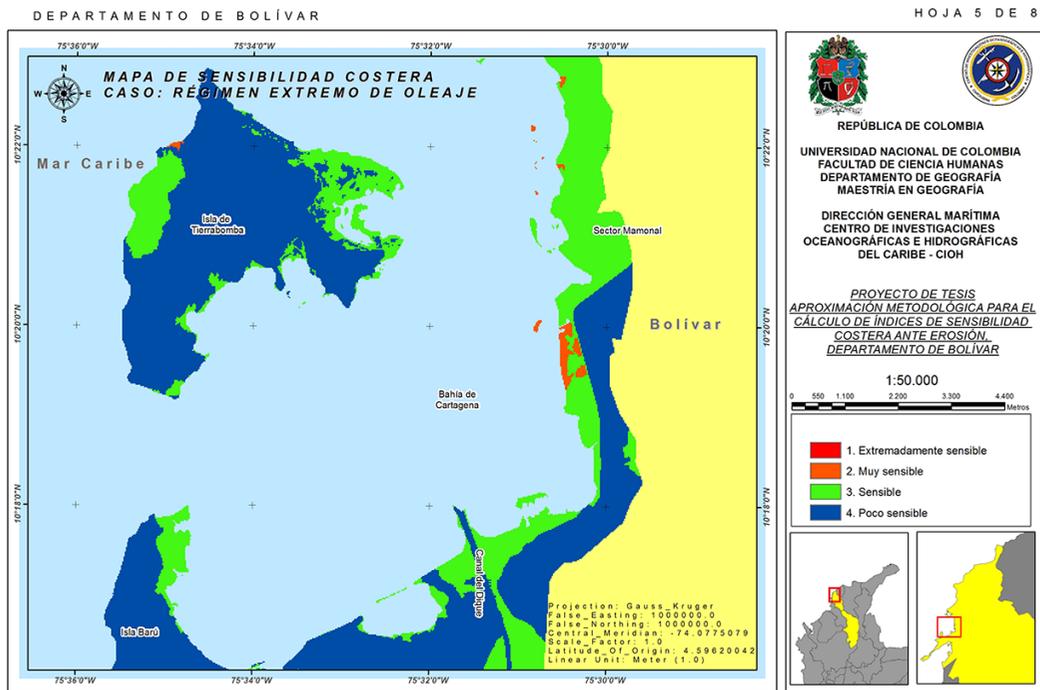


Figura 18. Mapa N° 5. Sensibilidad costera. Caso régimen extremo de oleaje.

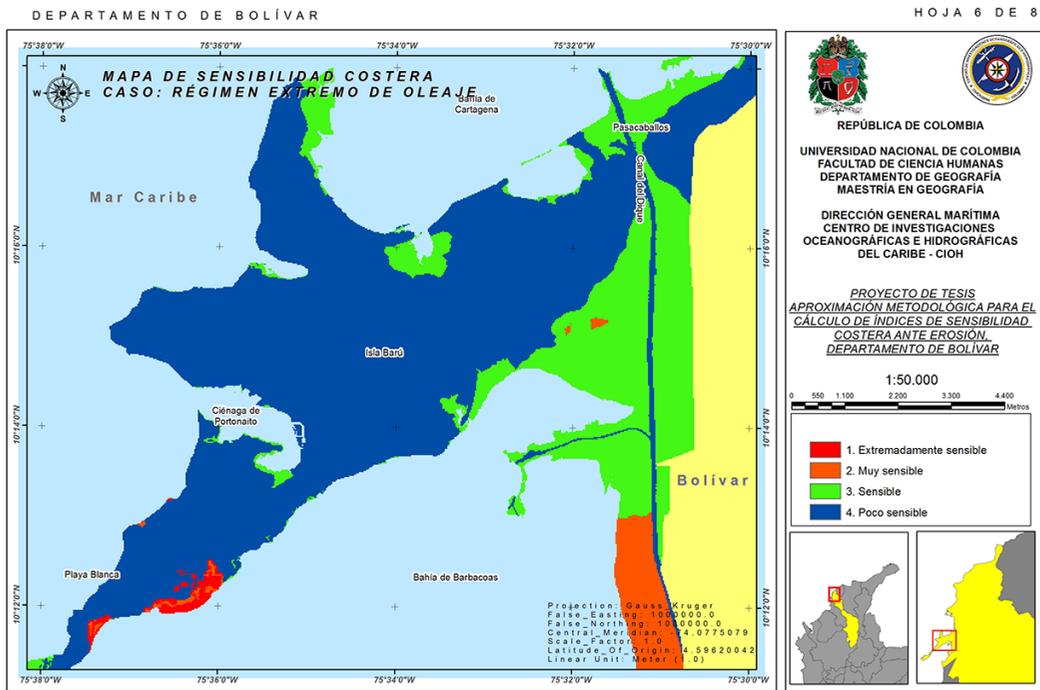


Figura 19. Mapa N° 6. Sensibilidad costera. Caso régimen extremo de oleaje.

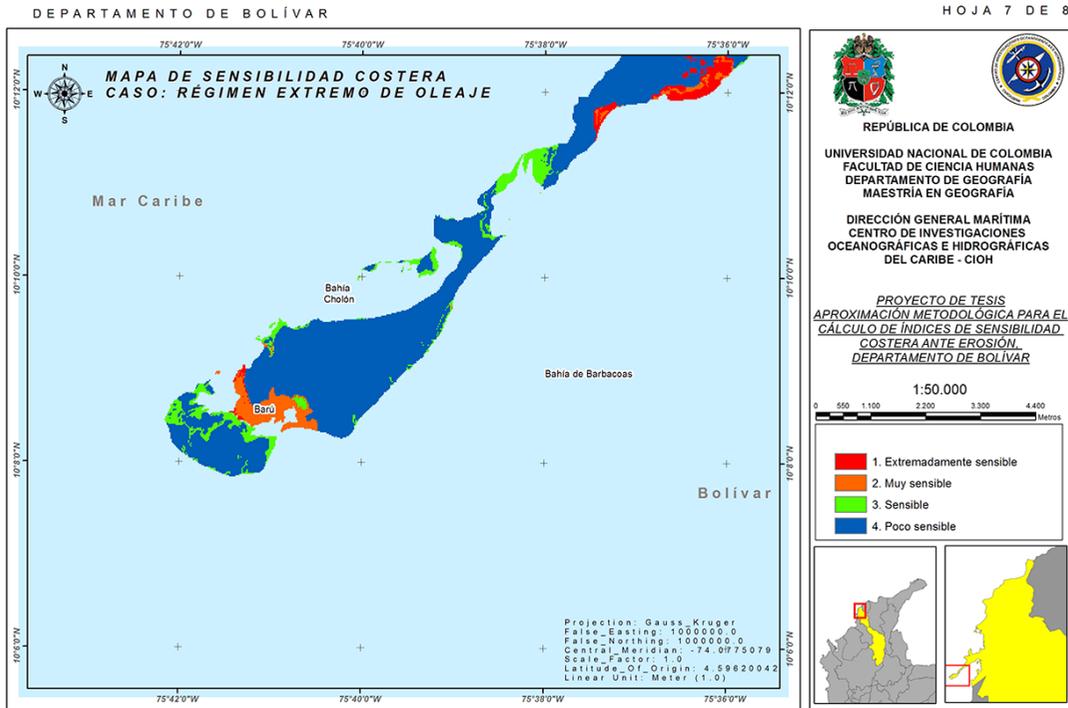


Figura 20. Mapa N° 7. Sensibilidad costera. Caso régimen extremo de oleaje.

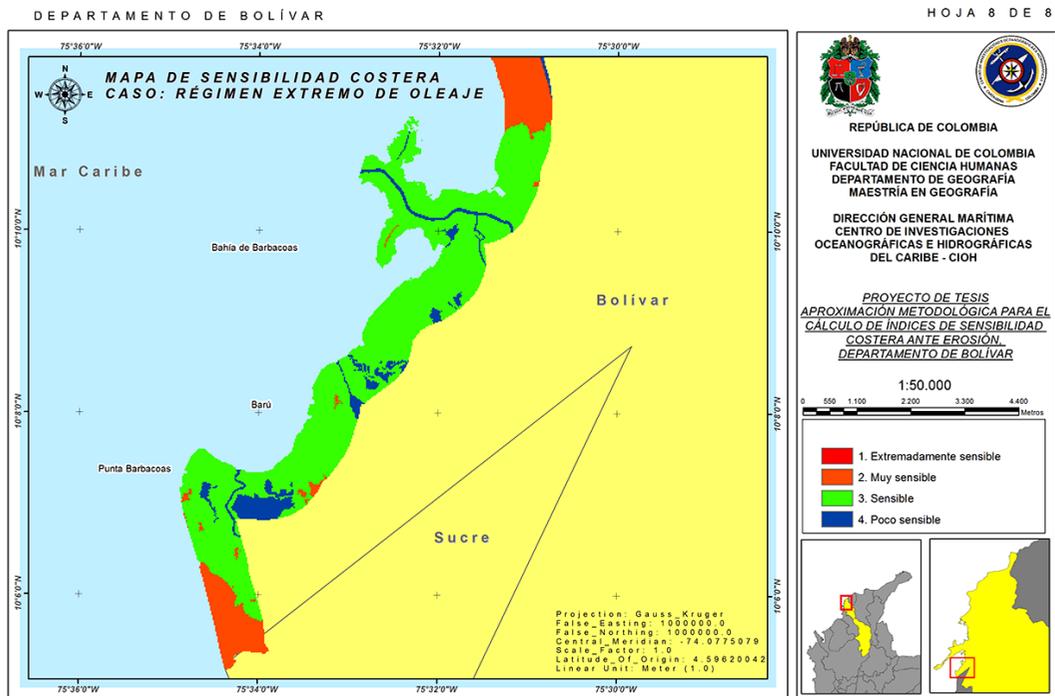


Figura 21. Mapa N° 8. Sensibilidad costera. Caso régimen extremo de oleaje.

CONCLUSIONES

La erosión costera está estrechamente relacionada con los procesos naturales que actúan sobre la costa. Es por esto que más allá de ser un problema en sí, es en realidad el resultado de agentes transformadores que desde siempre, han moldeado la forma de las costas de todos los continentes. Sin embargo, el sistema natural costero y sus impactos no pueden evaluarse de manera aislada sin considerar el factor humano y el resultado de actividades socioeconómicas y culturales que definen el uso del suelo que el hombre da a lo largo de la costa.

La aplicación de una metodología para elaboración de índices es una tarea compleja para la que no existe un único camino válido, ya que depende de la selección de determinadas variables consideradas como representativas, y de la asignación de pesos a cada una de ellas.

Para asignar pesos relativos a cada una de las variables hay que contar, inicialmente, con el conocimiento que el individuo (observador/experto) posee acerca de una determinada variable y su posible incidencia sobre la estructuración del índice.

Las variables seleccionadas representan un criterio de clasificación que cataloga a las unidades de análisis. Su integración define índices que proveen información agregada respecto al fenómeno estudiado más allá de su capacidad de representación por sí sola.

En el desarrollo de la investigación se elaboró una propuesta metodológica para la creación de índices de sensibilidad ante erosión costera, aplicando el método desarrollado por Varela (2005) el cual arrojó resultados muy satisfactorios de acuerdo con los resultados de la comparación histórica realizada a través de imágenes antiguas, debido a la asignación rigurosa y consistente de los pesos a las variables, a través de la capacidad interpretativa de los expertos encuestados, lo que le imprimió una postura intermedia en la discusión objetividad/subjetividad en la ponderación de variables.

Para clasificar las zonas de sensibilidad se utilizaron tres criterios seleccionados como

representativos e incidentes: 1. Unidades geomorfológicas presentes en la zona litoral del departamento de Bolívar; 2. Cobertura ecosistémica de la tierra; 3. Ángulos de la línea costera del departamento respecto al norte para el régimen extremo del oleaje.

El modelo aplicado fue Analytical Hierarchy Process (Varela, 2005), mediante el software ArcGIS versión 10.5, encontrando resultados satisfactorios. Sin embargo, es importante tener presente que la calidad del producto obtenido depende directamente de la resolución espacial y temporal de la información fuente utilizada, así como su precisión, exactitud, completitud, entre otros factores.

Por lo anterior, es necesario considerar que en el análisis espacial multicriterio, es importante revisar correctamente la fuente de información geográfica, así como de la información secundaria utilizada como base del conocimiento de cada criterio seleccionado.

Finalmente, es valioso resaltar que el uso de Sistemas de Información Geográfica basado en análisis multicriterio es esencial en el análisis de información espacial, dada la necesidad de utilizar e integrar una gran cantidad de datos espaciales de diversas fuentes e índoles para lograr la caracterización de los criterios e indicadores.

RECOMENDACIONES

La metodología basada en análisis multicriterio puede ser usada para cualquier área del conocimiento en la que intervengan diferentes criterios, indicadores, variables o parámetros cuantificables, siempre y cuando se cuente con un experto en la temática que realice la calificación de estos y en la zona de estudio.

Es necesario analizar correctamente la información espacial que se utilizará como base para la creación de los criterios, considerando que la variedad de fuentes o autores, propósitos para los que fue creada, escalas de estudio, entre otros factores, puede alterar los resultados obtenidos en el análisis o fortalecer los procesos de modelamiento que permiten la generación de la información geográfica resultante.

Para realizar un estudio más detallado acerca de la sensibilidad de la zona costera, es importante contar con información base más detallada de la zona, para así lograr analizar a nivel de detalle la afectación social de las comunidades que allí se asientan. Esto se puede lograr, estableciendo además esquemas de participación comunitaria que permitan a la comunidad tener el poder de participar como expertos de acuerdo con sus vivencias sociales y económicas.

Para reducir la subjetividad que se puede presentar en la calificación de los criterios e indicadores, se considera necesario contar con el apoyo de expertos en el área del conocimiento que se está evaluando, en este caso, la geomorfología, los ecosistemas y la dinámica costera, y que además tengan conocimiento del territorio de estudio. Esta actividad no garantiza la eliminación completa de la subjetividad ya que esta siempre estará y hará parte del análisis de los procesos de incertidumbre en estos modelamientos.

REFERENCIAS

- Esri. ArcGIS Resources. (s.f.). Geoprocesamiento con ModelBuilder, ¿qué es ModelBuilder? Recuperado de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/analyze/modelbuilder/what-is-modelbuilder.htm>
- _____. Caja de herramientas de conversión, conjunto de herramientas a raster. Recuperado de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/conversion-toolbox/an-overview-of-the-conversion-toolbox.htm>
- _____. Caja de herramientas de Spatial Analyst, concepto conjunto de herramientas de superposición. Superposición Ponderada. Recuperado de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/an-overview-of-the-overlay-tools.htm>
- Franco, C. A. (2011). Desarrollo de un modelo basado en análisis espacial multicriterio para la determinación de unidades de ordenación forestal. Caso departamento del Casanare. (Tesis de maestría) Universidad Nacional de Colombia. (p. 18)
- Gobernación del Departamento de Bolívar. (2012). Plan departamental de gestión del Riesgo. Bolívar, Colombia: Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo – UNGRD, Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo Colombia – PNUD y Proyecto Gestión Integral del Riesgo y adaptación al Cambio climático Caribe PNUD – UNGRD. (pp. 16).
- Saaty, T. (2000). Programa de Prospectiva Tecnológica para Latinoamérica y el Caribe, Manual De Metodologías Tomo V: La Técnica AHP. (pp 3-36)
- ONU Habitat (2011) Informe mundial sobre asentamientos humanos. Las ciudades y el cambio climático: orientaciones para políticas. Resumen ejecutivo. (pp. 32).
- Petersen, J., Michel, J, Zengel, S., White, M., Lord, C. y Plank, C. (2002) "Environmental sensitivity guidelines Versión 3.0." NOAA Technical memorandum NOS O y R 11. (pp 36)
- Robertson, K., Martínez, N. y Jaramillo, O (2003). Amenazas naturales asociadas al ascenso del nivel del mar en el Caribe colombiano. En Cuadernos de Geografía, XIII (1-2). 2003 (pp. 135-153). Bogotá D.C: Departamento de Geografía-Universidad Nacional de Colombia.
- Varela Pet, J., Saco López, P., Tarela Dobarro, Á. y Árias Rodríguez, J. (2005) Sistemas de información medioambiental. Capítulo 6. Análisis de decisión multicriterio espacial. (pp 117-134).