

A methodology for analysis of environmental impacts in offshore regions. Example for deep marine territories, in front of the coast of Córdoba department, Colombia

Juan Pablo Artunduaga-López^a, Alexis Jaramillo-Justinico^a, Juan Carlos Salazar-Uribe^b, Mauricio Alejandro Mazo-Lopera^b & Francisco Javier Rodríguez-Cortés^b

^a Instituto de Ciencias Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. jpartunduagal@unal.edu.co, aljaramilloju@unal.edu.co

^b Escuela de Estadística, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. jcsalaza@unal.edu.co, mamazol@unal.edu.co, frrodriguez@unal.edu.co

Received: November 6th, 2019. Received in revised form: March 9th, 2020. Accepted: March 27th, 2020

Abstract

The Colombian Caribbean Sea has hydrocarbon reserves, ecosystem diversity, fishing development, maritime transport, and the supply of communication networks [1-3]. The region manages a high demand for coastal marine space [2]. Therefore, it is necessary to consider sustainable development and understand the physical risks involved, as well as the dynamics of the systems, and their affectionation by anthropic activities. The research objective is the identification and analysis of geological, climatic and oceanographic elements found in deep areas and their incidence on the territory. The impact of natural elements was quantified using the ICI index (Impact Quantification Index) proposed in this work, which summarizes different sources of variation in a single value. A statistical analysis of qualitative interactions is presented for the understanding of environmental problems from a biophysical perspective and the generation of effective solutions to them.

Keywords: colombian Caribbean; anthropic activities; physical risks; marine sector and coastal; statistical analysis.

Una metodología para análisis de impactos ambientales en regiones de offshore. Ejemplo de caso territorios marinos profundos frente a la costa del departamento de Córdoba, Colombia

Resumen

El mar Caribe colombiano cuenta con reservas de hidrocarburos, diversidad ecosistémica, desarrollo de pesca, transporte marítimo, y el abastecimiento de redes de comunicación [1-3]. La región maneja una elevada demanda del espacio marino costero [2]. Por tanto, es necesario considerar un desarrollo sustentable y entender los riesgos físicos que implica, así como las dinámicas de los sistemas, y su afectación por las actividades antrópicas. El objetivo del trabajo es la identificación y análisis de elementos geológicos, climáticos y oceanográficos que se encuentran en zonas profundas y su incidencia sobre el territorio. El impacto de los elementos naturales, fue cuantificado mediante el índice ICI (Índice de Cuantificación de Impacto) propuesto en este trabajo y que resume diferentes fuentes de variación en un único valor. Se presenta un análisis estadístico de interacciones cualitativas para la comprensión de las problemáticas ambientales desde una visión biofísica y la generación de soluciones eficaces a las mismas.

Palabras clave: Caribe colombiano; actividades antrópicas; sector marino y costero; riesgos físicos; análisis estadístico.

How to cite: Artunduaga-López, J.P., Jaramillo-Justinico, A., Salazar-Uribe, J.C., Mazo-Lopera, M.A. and Rodríguez-Cortés, F.J., Una metodología para análisis de impactos ambientales en regiones de offshore. Ejemplo de caso territorios marinos profundos frente a la costa del departamento de Córdoba, Colombia. DYNA, 87(213), pp. 222-231, April - June, 2020.

1. Introducción

Los ambientes marinos profundos son regiones poco estudiadas, debido a que son espacios de difícil acceso por la connotación de “offshore” que los enmarcan en sistemas complejos para el análisis; no obstante, presentan una serie de características geológicas únicas tanto para el desarrollo de estructuras geológicas profundas (domos, cañones submarinos, “pockmarks”, etc.), como el establecimiento de comunidades biológicas altamente sensibles, tales como las comunidades quimiosintéticas y los corales de profundidad [4]. Por eso es necesario realizar estudios de estos ambientes y una caracterización de los elementos previamente mencionados que se encuentren en estas áreas con el objetivo de establecer, ya sean zonas con una importante relevancia ecológica, como lugares en donde se desarrollan o se establecen diferentes procesos geológicos que pueden afectar la estabilidad de la zona y que deben ser tenidos en cuenta al realizar intervenciones antrópicas, para que se adapten a las características del ambiente, con la finalidad de tener un desarrollo sostenible a corto, mediano y largo plazo de los recursos que se encuentran en estos sitios [3].

Es así como diferentes autores han realizado estudios ambientales enfocados a las áreas marinas y alguno específicamente en los ambientes “offshore”, que involucran ejes económicos, biológicos y físicos sobre estos ambientes [1-3,5-8]. Motivados con la problemática descrita, se realizó el presente estudio con el fin de caracterizar y analizar, los diferentes elementos abióticos, bióticos, paisajísticos, sociales, económicos y culturales, que pueden verse afectados por los diferentes procesos que se presentan en los ambientes marinos y sus áreas cercanas.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

El área de estudio se localiza en la región sur occidental del mar Caribe colombiano a unos 70 km de la línea de costa del departamento de Sucre, la cual cuenta con una extensión de 8.934,8 km² y una profundidad que puede oscilar entre los 500 m y los 3.400 m, ver Fig. 1. En el contexto regional, el suroccidente del mar Caribe colombiano se localiza en medio de la interacción de las placas Caribe y Suramericana [9-13], dicha interacción ha sido fuente para el desarrollo de un talud compuesto por una serie de pliegues que están a su vez asociados a un lineamiento regional conocido como el Cinturón de Deformación del Sur del Caribe, el cual ha generado cambios en la configuración del talud, produciendo específicamente en el sector suroccidental del Caribe, un prisma de acreción el cual se expresa en una serie de cuencas en medio de una cadena de colinas abisales [11,14,15].

2.2. Descripción de la metodología

Para el análisis de los diferentes elementos que se encuentran en el área de estudio, se desarrolló una matriz con un enfoque que brinda una mayor descripción de los procesos

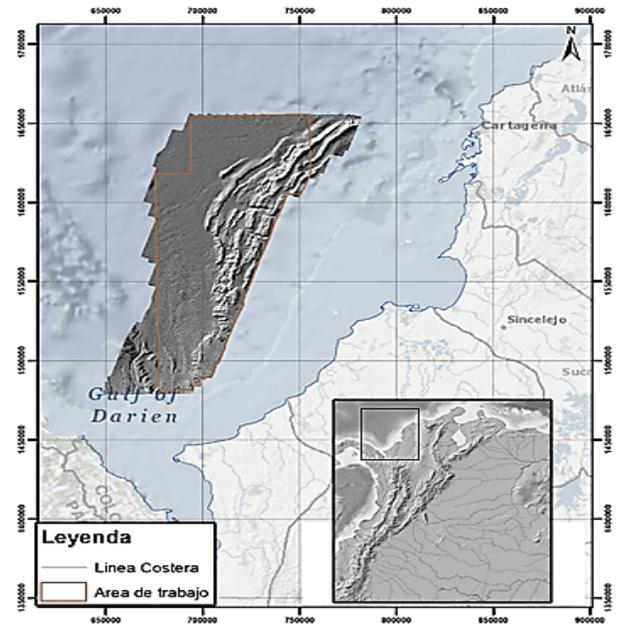


Figura 1. Área de estudio con relación a la región del mar Caribe colombiano.

Fuente: Los Autores.

físicos, relacionados con las diferentes afectaciones que estos pueden ocasionar a las áreas marinas, siendo este un punto de partida para el análisis ambiental de estos ecosistemas, previo a cualquier intervención de carácter antrópica. El objetivo fundamental es entender estos procesos físicos y evaluar sus posibles impactos sobre la estabilidad del territorio.

Como un paso previo a todo el desarrollo de la matriz de impactos ambientales, es necesario describir los diferentes aspectos que se encuentran en el territorio. Estos aspectos incluyen el análisis de los componentes abiótico, biótico, paisajístico, social, económico y cultural, los cuales a su vez incluyen factores especificados, que en términos conceptuales son todos los elementos que se encuentran dentro del área de trabajo o que se relacionen con la misma y que están representados en 6 componentes, como se presentan en la Tabla 1. Es importante mencionar que estos componentes se disponen en la parte horizontal de la matriz de impactos ambientales, teniendo en cuenta que serán los aspectos que se verán afectados por los diferentes procesos que tienen ocurrencia dentro o en cercanías al área de estudio. Así mismo, teniendo en cuenta la dinámica del área de estudio, se caracterizaron una serie de actividades o procesos naturales que se efectúan dentro del territorio o en sitios cercanos al mismo y que son consideradas como procesos de carácter geológico que se establecen dentro de la naturalidad de esta clase de ambientes y a los cuales se le ha denominado como acciones, que a su vez se encuentran divididas, en nueve tipos que pueden generar alteraciones en los diferentes componentes que hacen parte del territorio, ver Tabla 2. Por último, las acciones en la matriz de impactos se encuentran en la parte superior y de manera vertical con el fin de ver su relación con los diferentes factores del territorio.

Tabla 1.

Distribución de los componentes principales de los cuales se desprenden los factores evaluados para el área de estudio.

Componente Abiótico	Subcomponente Terrestre	Estructuras geológicas superficie de fondo marino
		Rocas superficiales
	Subcomponente Hídrico	Condiciones naturales del suelo
		Pendientes
Subcomponente Atmosférico	Columna de agua	
	Agua de las formaciones (Superficiales)	
Componente Biótico	Subcomponente de Biota	Condiciones climáticas del territorio
Componente Paisajístico	Subcomponente de Paisaje	Biota en sistemas marinos (Sistemas plantónicos, neotónicos y bentónicos)
		Geomorfología
Componente Social	Subcomponente de Ámbito Social y Formativo	Paleotopografía
		Población
		Conocimiento de la sensibilidad de los elementos (Amenaza)
		Legislación temática
Componente Económico	Subcomponente de Actividades Económicas	Comunidad científica
		Actividades de pesca
		Presencia de obras antrópicas
		Zonas potenciales de exploración
Componente Cultural	Subcomponente de Tradición y Patrimonio Cultural	Arqueología
		Actividades de pesca

Fuente: Los Autores.

Tabla 2.

Distribución de los diferentes tipos de acciones que se desarrollan en el área de estudio.

Tipo de acciones	Acciones de rango 1	Acciones de rango 2
Manifestación del proceso	Regional	
	Local	
Fenómenos de remoción en masa	Deslizamientos	
	Reptación	
	Sofusión	
	Soliflujión	
	Colapsamiento o hundimiento	
	Flujos de sedimentos de alta velocidad	
Anomalías paisajísticas asociadas a formas cónicas y dómicas	Procesos asociados a diapirismo	Domos diapíricos
		Volcanes de lodo
Dinámicas sedimentarias	Procesos de naturaleza intrusiva	Domos salinos
	Zonas erosivas	Ígneo
Actividad tectónica	Zonas de transporte	
	Zonas de depositación	
	Movimiento de falla	
	Deformación plástica	
Actividad sísmica	Deformación rígida	
	Contacto de placa	
	Probabilidad de afectación por sismos con magnitudes mayores a 7,0 MI	
	Probabilidad de afectación por sismos con magnitudes entre 6,0 y 7,0 MI; profundidad menor a 50 km	
	Probabilidad de afectación por sismos con magnitudes entre 4,0 y 6,0 MI; profundidades entre 50 y 100 km	
Corrientes submarinas	Probabilidad de afectación por sismos con magnitudes menores a 4,0 MI	
	Probabilidad de afectación por sismos con magnitudes menores a 3,0 MI	
	Corriente	
Modelamiento de Paisaje	Corriente turbidítica	
	Tendencia e inversión de las dinámicas de las corrientes marina	
Variabilidad climática del territorio	Zona con corrientes de baja intensidad	
	Densidad de elementos paisajísticos (Número de elementos reconocidos de la misma naturaleza / área equivalente)	
	Intensidad del modelamiento del paisaje	
Variabilidad climática del territorio	Alteración estructural en el paisaje	
	Cambios de la zona litoral	
	Estacionalidad del clima	
	Estacionalidad de evento	
	Fenómeno ENSO	

Fuente: Los autores.

Después de establecer tanto los factores como las acciones, se construyó una matriz de impactos ambientales; para ello fue necesario realizar una recopilación bibliográfica de los diferentes métodos, empezando por el origen de los estudios de impacto ambiental que se remontan al año de 1970 con la implementación de la Ley Nacional sobre Política Medio Ambiental (NEPA por sus siglas en inglés) desarrollada en Estados Unidos, la cual tiene como objetivo entregar parámetros para la ejecución de leyes ambientales, así como la coordinación de todo proceso de Estudios de Impacto Ambiental (EIA), siendo una ley que regula la planificación y evaluación de proyectos en años posteriores [16,17].

A medida que transcurre el tiempo, se han ido implementando diversas metodologías enfocadas en el desarrollo de una manera más integral para la gestación de la matriz de impactos. Entre estas metodologías se reconocen las listas de comprobación o "Check list", la Matriz de Leopold, Metodología Cualitativa, Sistema de Evaluación ambiental Batelle-Columbus, Método de Transparencias, Análisis de Costos-Beneficios, Modelos de Simulación y Sistemas Basados en un Soporte Informatizado del territorio [17-19], de las cuales, para efectos de ese trabajo se han utilizado como base la metodología cualitativa y el método de Leopold para la construcción de una nueva matriz. Por esta razón, es necesario mencionar que el Método Leopold diseñado en el año de 1970 por el Servicio Geológico del Departamento del Interior de los Estados Unidos [14], radica en generar una matriz con doble entrada, poniendo en las filas los factores ambientales y en las columnas las actividades que van desarrollándose en el proyecto; para efectos de esta investigación las columnas serán las acciones que generan impactos en el territorio. En esta clase de matrices se evalúan dos conceptos importantes: la magnitud y la importancia del impacto, así como la naturaleza del mismo la cual puede ser positiva o negativa. Por otro lado, la Metodología Cualitativa diseñada por Conesa [20-21], se basa en una calificación de 11 criterios que tiene como objetivo la realización de una reconstrucción más detallada del impacto ambiental en el territorio. De esta manera, cada criterio se evalúa de manera subjetiva a partir de las escalas cualitativas a los cuales se asignan un valor numérico, así como la naturaleza del impacto que puede ser de carácter positiva o negativa.

A partir de estas metodologías se construyó una matriz

basada en el Método de Leopold [22] y Conesa [23], ya que son muy trascendentales los conceptos de magnitud e importancia con los 11 criterios mencionados por Conesa [23]. Así mismo, la definición de magnitud se expresa como la suma de la intensidad, con la persistencia y la extensión, la cual se muestra en la parte superior izquierda de la matriz de impactos.

En resumen, la casilla se llenará de la siguiente manera: en la parte superior izquierda se encuentra la magnitud, mientras en la casilla inferior derecha aparece el concepto de importancia del impacto denotada por (*I*), el cual se extrae de la metodología de Conesa [23], mostrada en la Fig. 2.

En cuanto a la evaluación de la "Importancia del Impacto" es necesario definir y establecer los pesos de cada uno de los once criterios, los cuales se muestran en la Tabla 3 y los pesos generados por el autor para el presente estudio, los cuales se diferencian de Conesa [23]. Es importante mencionar que las valoraciones de todos estos criterios pueden variar dependiendo de las consideraciones que presenten los diferentes autores.

Con estos 11 criterios se establece la "Importancia del Impacto", la cual se expresa de la siguiente manera:

$$I = \pm(3In + 2Ex + Mo + Pe + Rv + Si + Ac + Ef + Pr + Rc), \quad (1)$$

donde *In*: intensidad, *Ex*: extensión, *Mo*: momento, *Pe*: persistencia, *Rv*: reversibilidad, *Si*: sinergia, *Ac*: Acumulación, *Ef*: efecto, *Pr*: periodicidad y *Rc*: recuperabilidad, siguiendo los argumentos en [23].

El resultado de esta sumatoria es la "Importancia del Impacto", la cual a su vez se distingue como positiva o negativa y se jerarquiza en una serie de rangos específicos, los cuales están consignados en la Tabla 4.

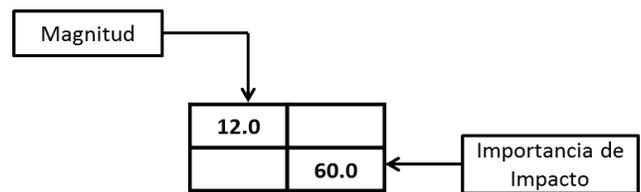


Figura 2. Casilla valorada para cada uno de los procesos evaluados en el presente estudio.

Fuente: Los Autores.

Tabla 3. Criterios evaluados dentro de los impactos ambientales.

Criterios	Características	Opciones	Presente estudio
Naturaleza (+/-)	Impacto positivo: es una afectación que produce efectos beneficiosos.	(+)	(+)
	Impacto negativo: Es un efecto que produce cualquier tipo de pérdida en las características del territorio.	(-)	(-)
Intensidad (I)	Es el grado de afectación que presenta el impacto sobre el territorio	Baja (1) Media (2) Alta (4) Muy alta (8) Total (12)	Baja (2) Media (4) Alta (6)
Extensión (E)	Es la magnitud del área afectada por el impacto.	Puntual (1) Parcial (2) Extensa (4) Total (8) Crítica (+4)	Puntual (2) Intermedio (4) Generalizado (6)

Momento (MO)	Se califica de acuerdo con el tiempo transcurrido entre la Actividad y la manifestación del impacto.	Largo plazo (1) Mediano plazo (2) Corto plazo (3) Inmediato (4) Crítico (+4)	Largo (cientos de años) (2) Mediano (años) (4) Corto (días) (6)
Persistencia (PE)	Evalúa el tiempo de permanencia del impacto.	Fugaz o momentáneo (1) Temporal o transitorio (2) Pertinaz o persistente (3) Permanente o constante (4)	Corto (2) Mediano (4) Largo plazo (6)
Reversibilidad (RV)	Es la capacidad que presenta el factor ambiental afectado	Corto plazo (1) Mediano plazo (2) Largo plazo (3) Irreversible (4)	Corto (2) Mediano (4) Irreversibilidad (6)
Recuperabilidad (MC)	Es la posibilidad de que el factor ambiental se reconstruya a partir de la intervención humana.	Recuperable de manera inmediata (1) Recuperable en el corto plazo (2) Recuperable en el mediano plazo (3) Recuperable en largo plazo (4) Mitigable, sustituible o compensable (4) Irrecuperable (8)	Recuperable (2) Parcial (4) Irrecuperable (6)
Sinergia (SI)	Es la capacidad que presenta la acción de interactuar con otras para amplificar sus efectos en el territorio.	Sin sinergismo o simple (1) Sinergismo moderado (2) Muy sinérgico (4)	Bajo (2) Medio (4) Alto (6)
Acumulación (AC)	Califica el incremento progresivo del impacto	Simple (1) Acumulativo (4)	No (4) Si (2)
Efecto (EF)	Es la forma de manifestación del efecto sobre el factor como consecuencia de la acción.	Indirecto o secundario (1) Directo o primario (4)	Indirecto (2) Directo (4)
Periodicidad (PR)	Es la regularidad con la que se manifiesta el efecto en el territorio.	Irregular, aperiódico y esporádico (1) Periódico o de regularidad intermitente (2) Continuo (4)	Discontinuo (2) Periódico (4) Continuo (6)

Fuente: Los Autores, siguiendo los criterios en Conesa [23].

Tabla 4.
Rangos de la Importancia ambiental de los impactos.

Impactos Negativos	Impactos Positivos	Rangos
Irrelevante	Leve	26-38
Moderado	Medio	39-50
Severo	Significativo	51-62
Crítico	Beneficioso	63-74

Fuente: Los Autores.

3. Resultados y discusiones

3.1. Análisis estadístico de la matriz de impactos ambientales

Debido al gran número de interacciones que se establecen dentro de la matriz de impactos ambientales, realizar un análisis individual no es adecuado dada la naturaleza multivariada del problema, es por tanto que con el objetivo de identificar correlaciones y grupos entre las diferentes interacciones de la matriz, se realizó un análisis estadístico el cual se basa en el desarrollo de un nuevo índice que resume la información de la matriz de tal manera que se unifique toda la información del problema denominado Índice de Cuantificación de Impacto (ICI), el cual proviene de la relación entre la magnitud y la importancia de impacto ambiental.

Otros autores han implementado metodologías para medir el impacto, por ejemplo, aplicando Índices de Sensibilidad Ambiental (ESI) [3,6], pero enfocados a evaluar los impactos de acciones antrópicas específicas para ambientes “offshore”, lo cual se complementa con lo planteado en el presente artículo, donde se establece un análisis de sensibilidad en un área marina con baja intervención.

El ICI se calculó para cada uno de los factores, siendo estos codificados en la Tabla 5.

- Componente abiótico (32 subniveles)
- Componente biótico (3 subniveles)
- Componente paisajístico (26 subniveles)
- Componente social (7 subniveles)
- Componente económico (3 subniveles)
- Componente cultural (2 subniveles)

Tabla 5.
Criterios evaluados dentro de los impactos ambientales.

Cód.	Categoría	Subcategoría 1	Subcategoría
A11	Manifestación del proceso	Regional	
A21	Manifestación del proceso	Local	
B11	Fenómenos de remoción en masa	Deslizamientos	
B21	Fenómenos de remoción en masa	Reptación	
B31	Fenómenos de remoción en masa	Sofusión	
B41	Fenómenos de remoción en masa	Soliflucción	
B51	Fenómenos de remoción en masa	Colapsamiento o hundimiento	
B61	Fenómenos de remoción en masa	Flujos de sedimentos de alta velocidad	
C11	Anomalías paisajísticas asociadas a formas cónicas y dómicas	Procesos asociados a diapirismo	Domos diapíricos
C12	Anomalías paisajísticas asociadas a formas cónicas y dómicas	Procesos asociados a diapirismo	Volcanes de lodo
C13	Anomalías paisajísticas asociadas a formas cónicas y dómicas	Procesos asociados a diapirismo	Domos salinos
C21	Anomalías paisajísticas asociadas a formas cónicas y dómicas	Procesos de naturaleza intrusiva	Ígneo
D11	Dinámicas sedimentarias	Zonas erosivas	
D21	Dinámicas sedimentarias	Zonas de transporte	
D31	Dinámicas sedimentarias	Zonas de depositación	
E11	Actividad tectónica	Movimiento de falla	
E21	Actividad tectónica	Deformación plástica	
E31	Actividad tectónica	Deformación rígida	
E41	Actividad tectónica	Contacto de placa	
F11	Actividad sísmica	Probabilidad de afectación por sismos con magnitudes mayores a 7,0 ML.	
F21	Actividad sísmica	Probabilidad de afectación por sismos con magnitudes entre 6,0 y 7,0 ML; profundidad menor a 50 km	
F31	Actividad sísmica	Probabilidad de afectación por sismos con magnitudes entre 4,0 y 6,0; profundidades entre 50 -100 km	
F41	Actividad sísmica	Probabilidad de afectación por sismos con magnitudes menores a 4,0 ML.	
F51	Actividad sísmica	Probabilidad de afectación por sismos con magnitudes menores a 3,0 ML.	
G11	Corrientes submarinas	Corriente	
G21	Corrientes submarinas	Corriente turbidítica	
G31	Corrientes submarinas	Tendencia e inversión de las dinámicas de las corrientes marina	
G41	Corrientes submarinas	Zona con corrientes de baja intensidad	
H11	Modelamiento de Paisaje	Densidad de elementos paisajísticos (Número de elementos reconocidos de la misma naturaleza /área equivalente)	
H21	Modelamiento de paisaje	Intensidad del modelamiento del paisaje	
H31	Modelamiento de paisaje	Alteración estructural en el paisaje	
H41	Modelamiento de paisaje	Cambios de la zona litoral	
I11	Variabilidad Climática del territorio	Estacionalidad del clima	
I21	Variabilidad Climática del territorio	Estacionalidad de evento	
I31	Variabilidad climática del territorio	Fenómeno ENSO	

Fuente: Los Autores.

El Índice de Cuantificación de Impacto (ICI) se establece mediante la siguiente expresión,

$$ICI = Sign \times Nivel \ de \ impacto \quad (2)$$

$$\times \left(1 - \frac{Magnitud}{Importancia \ de \ impacto} \right),$$

dónde, *Sign*: es igual a +1, si el impacto es positivo y -1, si el impacto es negativo. *Nivel de impacto*: se toman los

valores 1, 2, 3 y 4 según la clasificación por rangos utilizada en la Tabla 4, siendo para un impacto negativo, 1 irrelevante, 2 moderado, 3 severo y 4 crítico. Por otro lado, si el impacto es positivo el valor 1 es leve, 2 medio, 3 significativo y 4 beneficioso. La *Magnitud e Importancia de impacto ambiental* fueron definidas en la sección anterior.

Estos códigos serán de vital importancia para la comprensión en el análisis estadístico de los resultados obtenidos que en este artículo se enfocará en el estudio de los factores y acciones con base en el ICI, permitiendo establecer el peso que presenta cada acción que se ha establecido en la matriz dentro del territorio. Para efectuar este análisis es necesario reorganizar el ICI de las 33 acciones en términos de porcentajes, dando como resultado una serie de gráficos de barras “tipo tornado”, en donde se establecen diferencias de peso en cada una de las acciones acorde a todos los factores, esto a su vez permitió la generación de una serie de intervalos que muestran la jerarquización del ICI, ver Tabla 6.

Con la escala expuesta en la Tabla 6 se han fragmentado las acciones teniendo en cuenta su peso, así como su carácter positivo o negativo y su connotación dentro del territorio en relación a todos los factores consignados dentro de la matriz de impactos.

3.1.1. Análisis de las acciones teniendo en cuenta todos los factores

Se incluyen todos los factores que hacen parte de los componentes abiótico, biótico, social, económico y cultural, con el fin de establecer las acciones con mayor peso en el territorio. En la Fig. 3, se observa el peso de las diferentes acciones en relación con cada uno de los componentes que hacen parte de la matriz de impactos.

Tabla 6. Escala de valoración del ICI.

ICI	Intervalo de valoración del Índice (+/-)
< 1	Irrelevante
1-1,9	Bajo
2-2,9	Moderado
3, 0-4, 5	Significativo
> 4,5	Alto impacto

Fuente: Los Autores.

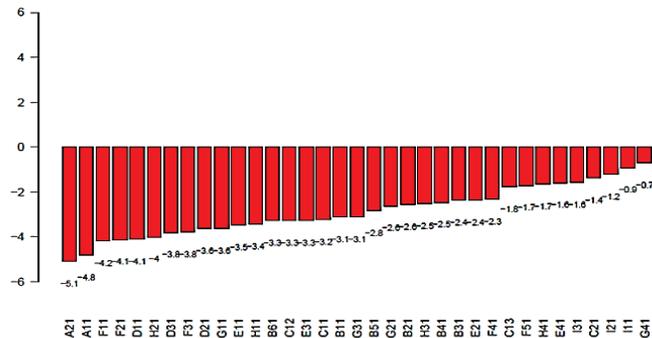


Figura 3. El peso de las acciones en relación con todos los componentes de los factores de la matriz de impactos.

Fuente: Los Autores.

Conforme a lo observado en la Fig. 3, y en función de la escala de valoración del ICI generada en la Tabla 6, se encontró que tomando en cuenta las 35 acciones en relación con todos los factores, existen 2 acciones que se encuentran dentro de la categoría de Alto Impacto, mientras que en la categoría de Significativo aparecen 16 acciones. De otro lado, dentro de la categoría de Moderado se han resultado 8 acciones, en la categoría de Bajo se han asociado 7 acciones, finalmente en la categoría de Irrelevante aparecen 2 acciones, ver Tabla 7.

Tabla 7. Importancia del Impacto de las diferentes acciones en relación con todos los factores evaluados en el territorio.

Intervalo del Coeficiente de Impacto	Jerarquización de las subcategorías evaluadas (mayor índice a menor índice)	
	1) Local	2) Regional
Alto Impacto	1) Probabilidad de afectación por sismos con magnitudes mayores a 7,0	9) Movimiento de falla
	2) Probabilidad de afectación por sismos con magnitudes entre 6,0 y 7,0; profundidad menor a 50 km	10) Densidad de elementos paisajísticos (Número de elementos reconocidos de la misma naturaleza /área equivalente)
	3) Zonas erosivas	11) Flujos de sedimentos de alta velocidad
	4) Intensidad del modelamiento del paisaje	12) Volcanes de lodo
	5) Zonas de depositación	13) Deformación Rígida
	6) Probabilidad de afectación por sismos con magnitudes entre 4,0 y 6,0; profundidades entre 50 -100 km	14) Domos diapíricos
	7) Zonas de transporte	15) Deslizamientos
	8) Corriente	16) Tendencia e inversión de las dinámicas de las corrientes marina
Significativo	1) Colapsamiento o hundimiento	5) Soliflucción
	2) Corriente turbidítica	6) Sufusión
	3) Reptación	7) Deformación plástica
	4) Alteración estructural en el paisaje	8) Probabilidad de afectación por sismos con magnitudes entre 4,0 y 3,0 MI
	1) Domos salinos	5) Fenómeno ENSO
	2) Probabilidad de afectación por sismos con magnitudes menores a 3,0MI	6) Ígneo
	3) Cambios de la zona litoral	7) Estacionalidad de evento
	4) Contacto de Placa	
Moderado	1) Estacionalidad del clima	2) Zona con corrientes de baja intensidad
Bajo		
Irrelevante		

Fuente: Los Autores.

A partir del análisis de la matriz de importancia del impacto y el del ICI, se encontraron dos acciones, “manifestación de proceso local” y “manifestación de proceso regional” las cuales presentan el mismo peso ambiental, siendo ambos de valores extremos, como consecuencia en ellos se evaluaron todas las interacciones matriciales (factor / acción). Por lo tanto, debe interpretarse con cuidado, ya que estas acciones se vinculan con el aspecto de territorialidad de los factores, ver Tabla 7.

En cuanto a la categoría de Significativo, las acciones que tienen mayor relevancia dentro de este intervalo, están asociadas a la “Actividad Sísmica” siendo importantes los sismos con magnitudes mayores a 7,0 MI, los sismos con magnitudes entre 6,0 y 7,0 MI y los sismos con magnitudes entre 4,0 MI y 6,0 MI. Este efecto se explica, debido a que esta clase de sismos pueden ocasionar grandes afectaciones en el territorio, que a su vez desencadenan en una sinergia elevada con otras interacciones como es el caso de los fenómenos de remoción en masa. En un segundo orden, se encuentran catalogadas las zonas de erosión, transporte y sedimentaciones, las cuales hacen parte del grupo de “Dinámica Sedimentaria”, teniendo todas ellas un gran impacto sobre los diferentes factores que se encuentran en el territorio, siendo destacable su peso en los componentes abióticos, paisajístico y cultural, así mismo manejan interacciones de carácter sinérgico en cada uno de estos componentes. En un tercer orden, aparecen el movimiento de falla y la deformación rígida, las cuales son acciones del grupo de “Actividad Tectónica” que tienen un mayor impacto dentro del territorio, siendo en los componentes abiótico, biótico y paisajístico, en donde se observan las mayores interacciones. Por otro lado, la intensidad de modelamiento de paisaje y densidad de elementos son las acciones de “Modelamiento de paisaje” que tienen mayor impacto en el territorio, manejando un gran peso dentro de los componentes abiótico, biótico y paisajístico. Las corrientes y la tendencia e inversión de sus dinámicas que hacen parte del grupo de “Corrientes submarinas” son las acciones que tienen mayores repercusiones en el territorio, destacando su relación con los componentes abiótico, biótico, paisajístico y social. En el grupo de acciones de fenómenos de remoción en masa, se destacan los flujos de alta velocidad y los deslizamientos, los cuales afectan de manera importante los componentes abiótico, paisajístico, económico y cultural. Por último, dentro de esta categoría se encuentran los volcanes de lodo y domos diápiricos que son las acciones de “Anomalías paisajísticas asociadas a formas cónicas y dómicas” que tienen mayor relevancia para el territorio, afectando de gran manera los componentes abiótico, biótico, social y cultural.

Dentro de la categoría de Moderado, las acciones que tienen mayor relevancia dentro de este intervalo están asociadas al grupo de “Fenómenos de remoción en masa”, siendo importantes los colapsamientos, las reptaciones, las solifluxiones y las sofusiones, enfocando sus afectaciones en los componentes abiótico, biótico, y paisajístico. En un segundo orden de importancia se encuentra la corriente turbidítica, la cual hace parte del grupo de “Corrientes submarinas”, generando afectaciones importantes en los

componentes paisajísticos y sociales, mientras que en el resto de componentes su afectación es moderada. En un tercer orden se encuentra la deformación plástica, la cual hace parte del grupo de “Actividad tectónica”, la cual maneja afectaciones en los componentes abiótico, paisajístico y social. Por último, dentro de esta categoría se encuentra la acción de sismos con magnitudes entre 4,0 MI y 3,0 MI que hace parte del grupo de “Actividad sísmica”; esta acción tiene un impacto moderado en el territorio, teniendo afectaciones significativas en los componentes biótico y social, mientras en los componentes abiótico, paisajístico, económico y cultural sus implicaciones son de carácter moderadas para el territorio.

En la categoría de Bajo, las acciones que tienen mayor peso son los domos salinos, así como los procesos de naturaleza intrusiva, las cuales se encuentran catalogadas dentro del grupo de “Anomalías paisajísticas asociadas a formas cónicas y dómicas”, enfocando sus interacciones en los componentes abióticos y paisajísticos, mientras en los componentes biótico, social, económico y cultural tienen poca relevancia. En un segundo escalón se encuentran los sismos con magnitudes menores a 3,0 MI, la cual es una acción que hace parte del grupo de “Actividad sísmica” que tiene un impacto bajo en los componentes abiótico, paisajístico y económico. En tercer orden se encuentra los cambios en la zona litoral, la cual es una acción que hace parte del grupo de “Modelamiento de paisaje” que maneja baja afectaciones en el territorio de manera directa, siendo los componentes biótico y social los que presenta mayor afectación por este tipo de acción. En un cuarto orden se encuentra la acción de contacto de placa que hace parte del grupo de “Actividad tectónica”, la cual tiene un impacto bajo en el territorio, ya que no posee interacciones en los componentes bióticos, culturales y económicos, mientras en los componentes abióticos y sociales maneja una serie de afectaciones moderadas. Por último, dentro de esta categoría se encuentran el Fenómeno ENSO y la estacionalidad del evento, las cuales son acciones que hacen parte del grupo de “Variabilidad climática” y que presentan características únicas, ya que, en los componentes social y económico, manejan una serie de interacciones positivas en relación con el territorio, lo cual disminuye las posibles afectaciones negativas en el resto de componentes que han sido reconocidos para este trabajo.

En la categoría Irrelevante, se encuentran únicamente dos acciones, la primera de ellas es la estacionalidad del clima que hace parte del grupo de “Variabilidad climática”, cuya valoración es el resultado de una equivalencia entre las interacciones positivas en los componentes biótico, social y económico que se compensan con las afectaciones negativas que se establecen en los componentes abiótico, paisajístico y cultural. La segunda acción son las zonas con corrientes de baja intensidad que hace parte del grupo de “Corrientes submarinas”, las cuales tienen una serie de impactos positivos en los componentes biótico y social, que se contraponen a los impactos negativos bajos en los componentes biótico y paisajístico, dando como resultado un nivel de impacto irrelevante.

A partir de las categorías abstraídas del intervalo de valoración del ICI, se debe plantear una serie de actividades para mitigar el efecto de las acciones en el territorio, y permitir un uso adecuado de los recursos en el caso en que se establezcan diversas actividades antrópicas; así mismo estas actividades estarán supeditadas a las categorías del intervalo del ICI, siendo las categorías de Alto o Significativo las que tendrán mayores medidas para su potencial uso en futuras actividades.

En cuanto a las acciones que se encuentren en las categorías de Alto Impacto y Significativo, se deben establecer medidas como el desarrollo de fuentes primarias de información, la generación de estudios detallados a escalas 1:10.000 o 1:20.000, el despliegue de mapas de los procesos geológicos que se den en estos ambientes, y el planteamiento de zonas que estarán establecidas como “Zonas de Exclusión” o “Zonas de Restricción”, las cuales tendrán un tratamiento especial, ya sea por los recursos ecosistémicos disponibles o por los procesos geológicos que se desarrollan en el territorio; de la misma manera estos sitios estarían en función del nivel de intervención antrópica siendo las zonas catalogadas como Zonas de Exclusión, las áreas en donde se recomendaría no realizar actividades o actividades de bajo impacto tanto al ecosistema como a la estabilidad del medio ambiente.

Por otro lado, las zonas definidas como Zonas de Restricción podrán ser utilizadas para un mayor número de actividades antrópicas; no obstante, serán necesarios estudios técnicos que precisen tanto la oferta de servicios biológicos como la estabilidad del terreno a escalas 1:10.000 o 1:20.000. Para las acciones que se hallen en la categoría de Moderada, deberán considerarse medidas como el desarrollo de fuentes primarias de información, la generación de estudios detallados a escalas 1:10.000 o 1:20.000, el despliegue de mapas de los procesos geológicos que se den en estos ambientes, y el planteamiento de zonas que estarán establecidas solamente como Zonas de Restricción, ya que las implicaciones de estas acciones son menores en relación a la estabilidad de condiciones naturales del territorio.

En cuanto a las acciones que se encuentren dentro de la categoría de Moderada, deberán tener un nivel de restricción respecto a las categorías anteriormente mencionadas; sin embargo, en muchas de las acciones se recomendaría definir algunas Zonas de Restricción de cierto tipo de actividades antrópicas, dependiendo de las características del proceso geológico o la oferta biológica del territorio.

Por último, las acciones que se encuentren dentro de las categorías de Bajo e irrelevante impacto, a priori no tendrán ninguna medida de restricción; sin embargo, se deben realizar medidas preventivas, entre las cuales se destaca el desarrollo de la línea base del territorio que incluye tanto la recolección de información primaria como la generación de estudios detallados a escalas 1: 10.000 o 1:20.000, y el despliegue de mapas de los procesos geológicos que se produzcan sobre esta clase de ambientes.

4. Conclusiones

A partir de la caracterización ambiental y posteriormente el desarrollo de la matriz se han establecido para el área de trabajo un total de 72 factores que provienen de los componentes abiótico, biótico, paisajístico, paisajístico, social, económico y cultural, los cuales a su vez podrían verse afectados por un total de 35 acciones potenciales, las cuales están representando los diferentes procesos geológicos y mete-oceanográficos que pueden incidir en el desarrollo de cualquier actividad antrópica que se genere en este tipo de zonas marinas de aguas profundas.

Se desarrolló una nueva metodología para la generación de una matriz ambiental basada en el concepto de ICI, el cual proviene a su vez de la inclusión de la magnitud e importancia de impacto propuesto por los autores de Leopold [22] y Conesa [23]. Así mismo, este ICI es indispensable para el análisis estadístico de las interacciones establecidas en la matriz para el territorio.

Con el desarrollo del ICI se han podido analizar un total de 2.500 interacciones que derivan de la relación entre los 72 factores y las 35 acciones potenciales para el territorio, generando herramientas de análisis estadístico y sin vicios del autor. Estos análisis permiten la jerarquización de acciones dentro de un área con poca intervención estableciendo una línea base de impactos potenciales, la cual se puede complementar con estudios sobre sensibilidad ambiental por actividades antrópicas específicas como las petroleras [3,6].

El ICI también se implementó como una herramienta para la jerarquización de las diferentes acciones que impactan el territorio, resaltando las acciones con mayor peso en todos los factores de los diferentes componentes que hacen parte de los factores de la matriz. Con esta información extraída del ICI, se ha podido observar cuales son los grupos de acciones con mayores afectaciones en orden de importancia para el área de estudio, siendo la actividad sísmica (sismos mayores 7,0; sismos entre 6,0MI y 7,0MI; sismos entre 4,0 MI y 6,0MI), la dinámica Sedimentaria (zonas de transporte; zonas de depositación; zonas de erosión), la actividad tectónica (movimiento de falla; deformación rígida), las corrientes submarinas (corriente, tendencia e inversión de las dinámicas de las corrientes marinas), los fenómenos de remoción en masa (flujos de sedimentos de alta velocidad y deslizamientos), modelamiento de paisaje (intensidad y densidad de elementos paisajísticos) y las anomalías paisajísticas asociadas a formas cónicas y dómicas (volcanes de lodo y domos diapíricos), las más significativas.

Con la jerarquización de dichas acciones en función del grado de afectación, se ha planteado la necesidad de establecer una serie de recomendaciones que dependerán de el intervalo de valoración del índice ICI, siendo en las categorías de Alto y Significativo, en donde se deben establecer mayores medidas preventivas, como es el desarrollo de Zonas de Exclusión y Zonas de Restricción que estarán supeditadas a una línea de investigación que mejore el nivel de los estudios de línea base para esta clase de ambientes.

Por otro lado, en las categorías de Bajo e Irrelevante, no se plantea la generación de zonas restrictivas de uso de actividades antrópicas, si no se debe proyectar el desarrollo de conocimiento a partir de la implementación de estudios de línea base, enfocados en la recolección de información primaria, así como en la elaboración de estudios detallados.

Referencias

- [1] Marta-Almeida, M., Ruiz-Villarreal, M., Pereira, J., Otero, P., Cirano, M., Zhang, X. and Hetland, R., Efficient tools for marine operational forecast and oil spill tracking, *Marine pollution bulletin*, 71(1-2), pp. 139-151, 2013. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2013.03.022.
 - [2] Ibarra, M., Las zonas francas: mecanismo indispensable para los nuevos proyectos de Colombia. VIII Congreso de Zonas Francas - ANDI. Cartagena, Colombia, 2014.
 - [3] Bogotá, G., Flórez A. y Guzmán J., Sensibilidad ambiental ante un posible derrame offshore aplicando tecnologías geoespaciales, costa Caribe colombiana. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica*. 11(1), 95-109, 2018. DOI: 10.22201/iingen.0718378xe.2018.11.1.57813.
 - [4] Alonso, D., Segura-Quintero, C., Torres, C., Rozo-Garzón, D., Espriella J.L., Bolaños, J. y López, A., Áreas significativas para la biodiversidad. pp 393-423. En: *Biodiversidad del margen continental del Caribe colombiano*. Serie de Publicaciones Especiales, Invemar No. 20, Invemar Eds., 2010, 458 P. DOI: 10.21239/V9F59B.
 - [5] Arteaga, J. y Herrera, A., Estado del arte de las estructuras offshore en el Caribe colombiano, Tesis de grado, Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, 2014, 59 P.
 - [6] Jensen, J., Halls, J. y Michel, J., A Systems approach to Environmental Sensitivity Index (ESI) mapping for oil spill contingency planning and response, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 64(10), pp. 1003-1101, 1998.
 - [7] Gil-Agudelo, D.L., Nieto-Bernal, R.A., Ibarra-Mojica, D.M., Guevara-Vargas, A.M. and Gundlach, E., Environmental sensitivity index for oil spills in marine and coastal areas in Colombia. *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro*, 6(1), pp. 17-28, 2015. DOI: 10.29047/01225383.24.
 - [8] Ospino-Sepúlveda, L. y López-Rodríguez, A., Definición de Unidades Ambientales de Análisis (UAA): método alternativo como base para la zonificación ambiental de ecosistemas marino-costeros. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* 48(1), pp. 103-117, 2019. DOI: 10.25268/bimc.invemar.2019.48.1.760.
 - [9] Duque-Caro, H., Structural style, diapirism, and accretionary episodes of the Sinu´ - San Jacinto terrane, southwestern Caribbean borderland. In: Bonini, W.E., Hargraves, R.B. and Shagam, R. (Eds.), *The Caribbean-South American Plate Boundary and Regional Tectonics*. The Geological Society of America, Memoir 162, pp. 303-316, 1984.
 - [10] Cediell, F., Shaw, R and Ca´ Ceres, C., Tectonic assembly of the northern Andean block. In: Bartolini, C., Buffler, R.T. and Blickwede, J., Eds., *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics*. AAPG Memoir 79, pp. 815-848, 2003.
 - [11] Flinch, J.F., Structural evolution of the Sinu´ -Lower Magdalena area (Northern Colombia). In: Bartolini, C., Buffler, R.T. and Blickwede, J. Eds., *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics*. AAPG Memoir 79, pp. 776-796, 2003.
 - [12] Benguigui, A., Deville, E. and Paéz, A., Tectonic framework, kinematics of deformation and petroleum system evaluation of the offshore Sinu´ accretionary wedge. XII Congreso Venezolano de Geofísica, 2004.
 - [13] Granja-Bruña, J.L., Geodinámica del borde noreste de la placa Caribe. PhD Tesis, Universidad Complutense de Madrid, España, [en línea]. 2005. Available at: https://eprin.ts.ucm.es/5870/1/GEODIN%C3%81MICA_DEL_BORDE_NE_DE_LA_PLACA_CARIBE.pdf. Accessed 1 Jun 2018.
 - [14] Villamil, T., Campanian-Miocene tectonostratigraphy, depocentre evolution and basin development of Colombia and western Venezuela. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 153, pp. 239-275, 1999. DOI: 10.1016/S0031-0182(99)00075-9.
 - [15] Vinnels, J.S., Butler, R.W.H., McCaffrey, W.D. and Paton, D.A., Depositional processes across the Sinu´ accretionary prism, offshore Colombia. *Mar. Pet. Geol.* 27(4), pp. 794-809, 2010. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2009.12.008.
 - [16] García-Leyton, L.A., Aplicación del análisis multicriterio en la evaluación de impactos ambientales. Tesis Dr., Departament de Projectes d'Enginyeria, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España 2004.
 - [17] De La Maza, C.L., Evaluación de impactos ambientales: en manejo y conservación de recursos forestales. Editorial Universitaria, 2007, pp. 579-609
 - [18] De La Maza, C.L., NEPA's influences in developing countries: the Chilean case. *Environmental Impact Assessment Review*. 2001, pp. 169-179. DOI:10.1016/s0195-9255(00)00073-1.
 - [19] Rosero, J., Florian, E., Toro, J.J., Martínez, L.F., Caro, A.L., Duran, J.C. and Pacheco, N., Metodología para la evaluación de impactos ambientales. Editorial Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá, 2016.
 - [20] Conesa, V., Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España, 1993, 276 P.
 - [21] Conesa, V., Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental. 3ª ed., Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España, 1997, 412 P.
 - [22] Leopold, L.B., Clarke, F.E., Hanshaw, B.B. and Balsley, J.R., A procedure for evaluating environmental impact. *Geological Survey Circular* 645, U.S.D.I., Washington D.C., USA, 1971.
 - [23] Conesa, V., Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, México. 2010, 371 P.
- J.P. Artunduaga-López**, is research geologist who has worked with the Natural Sciences Institute (ICN), Universidad Nacional de Colombia, Campus Bogotá, Colombia. I'm finishing the process of MSc. in Science-Geology at the Universidad Nacional de Colombia. My research focus mainly on marine geology and environmental impact analysis. Finally, I have work as an environmental consultant in the area of geology. ORCID:0000-0001-9508-3264.
- A.J. Jaramillo-Justinico**, is associate professor at The Natural Sciences Institute (ICN), Universidad Nacional de Colombia, Campus Bogota. I hold a PhD, in Prehistory and Archeology from the University of Granada, Andalucía, España. ORCID: 0000-0003-2696-8100
- J.C. Salazar**, is associated professor and Director of the Research Group in Statistics at the Faculty of Sciences, Universidad Nacional de Colombia, Campus Medellín. I hold a PhD. in Statistics from the University of Kentucky, Lexington, USA. My research focuses mainly on linear mixed models, stochastic models, survival analysis, biostatistics and epidemiology. My papers have appeared both in national and international scientific journals. I have also published two text books. Finally, I have also worked as a statistical consultant for local. ORCID:0000-0003-2286-3627.
- M. Mazo-Lopera**, received a PhD. in Statistics at the Universidad Nacional de Colombia, Colombia. He is a MSc. in Statistics at the Universidade de São Paulo, Brazil and Mathematician in the Universidad de Antioquia, Colombia. He is a full-time professor and researcher at the School of Statistics at the Universidad Nacional de Colombia, Colombia. ORCID: 0000-0003-1825-6226.
- F.J. Rodríguez-Cortés**, received a PhD. in Computational Mathematics at the University Jaume I, Spain. He graduated as MSc. in Computational Mathematics at the University Jaume I, Spain and have a BSc. in Mathematics at the University of Antioquia, Colombia. He is a full-time professor and researcher in spatial statistics at the Statistical School of the Universidad Nacional de Colombia, Colombia. ORCID: 0000-0002-2152-8619.