

EVALUACIÓN DEL RIESGO DEBIDO A DERRAME DE HIDROCARBUROS EN LA BAHÍA DE TUMACO

Carlos Enrique Tejada Vélez^{1*}
Fernando Afanador Franco^{2*}

División de Zona Costera, Centro Control Contaminación del Pacífico –CCCP
Vía El Morro, Capitanía de Puerto, San Andrés de Tumaco, Nariño, Colombia
Tél: +57 (2) 727 26 37, Fax: +57 (2) 727 11 80
e-mail: cccp@cccp.org.co
ctejada@cccp.org.co^{1*}
fafanador@cccp.org.co^{2*}

Recibido en mayo de 2003; aceptado en noviembre de 2003

RESUMEN

Se presenta la metodología utilizada para evaluar el riesgo por derrame de hidrocarburos sobre el borde costero y los resultados de su aplicación en la bahía de Tumaco. Para ello se describen las principales etapas que inician con la recopilación de la información existente sobre el área de interés, especialmente relacionada con tres aspectos: el *ecosistema*, potencialmente afectado; el *hombre*, que se asienta sobre esa zona, y el *contaminante* en sí. Luego con dicha información se procede a desarrollar los siguientes pasos de la metodología: (i) Determinación de las fuentes de amenaza por derrame de hidrocarburos, teniendo en cuenta la localización de los diferentes sitios de almacenamiento, manipulación y transporte; (ii) Elaboración del mapa de fuentes de amenazas; (iii) Zonificación por áreas del posible desplazamiento de la mancha; (iv) Determinación de la vulnerabilidad con base en los criterios establecidos, y (v) Evaluación del riesgo. Varios de los pasos mencionados se realizan utilizando como herramienta Sistemas de Información Geográfica, SIG, mediante los cuales se facilita no sólo el almacenamiento de la información georreferenciada, sino que se aprovechan las opciones de adición, sustracción, intersección y la vinculación de mapas con bases de datos. Los resultados obtenidos se centran en el caso de un derrame en el terminal boyero de la Empresa Colombiana de Petróleos, Ecopetrol, y muestran la importancia de la marea; es decir, se requiere conocer además de si está en flujo (ingreso del agua de mar hacia el litoral) o reflujo (salida del agua de mar desde el litoral); si está en sicigia (la Tierra, la Luna y el Sol ubicados en un mismo plano en línea recta) o cuadratura (el Sol y la Luna forman un ángulo recto con la Tierra).

Palabras Claves: Riesgos Marinos, Derrame de Hidrocarburos, SIG, Bahía de Tumaco, Evaluación de Riesgos, Contaminación Marina.

ABSTRACT

This paper presents the methodology used to evaluate oil spill risk assessment on coastal areas and the results of its application in the Tumaco Bay. The main stages are described beginning with collecting all the information of the area, specially related with three aspects: the Ecosystem potentially affected, the Man that settles on that area and the Pollutant. Then with this information proceeds to: (i) Determine hazard sources for oil spills, keeping in mind the localization of the different storage, manipulation and transport places; (ii) Construction of hazard sources map; (iii) Zonification by areas of probable oil slick movement; (iv) Vulnerability determination based on the criteria established, and (v) Risk assessment. Some of the steps mentioned above, were carried out using Geographic Information Systems (GIS), as a basic tool, by means of which is facilitated, not only the storage of the georeferenced information, but the advantage of its addition, subtraction and, intersection tools and the linking of maps with databases. The obtained results are centered in the case of a spill in the Ecopetrol terminal and they show the importance of the tide; that is to say, it is required to know not only if it is in ebb or flow but if it is Spring or Neap tide. In case that the spill occurs during Neap tide (smaller range), there will be larger reaction time for reaction and mitigation. On the other hand, if the spill happens at spring tide (alignment sun - earth - moon), the reaction time will be smaller since the oil slick will arrive quicker to more sensitive areas.

Key words: Maritime Risk, Oil Spills, GIS, Tumaco Bay, Risk Assessment, Marine Pollution.

INTRODUCCION

La bahía de Tumaco alberga el segundo puerto en importancia del país sobre el litoral Pacífico, siendo la exportación de hidrocarburos la actividad económica de mayor volumen que se realiza a través de un terminal boyero ubicado en cercanías de la isla de Bocagrande.

Esa situación hace a la bahía, particularmente, vulnerable a derrames de petróleo, como en efecto ha sucedido en años anteriores, con el buque/tanque Saint Peter (1976) y el Daedalus (1996); el relacionado con la Empresa Estatal de Petróleos del Ecuador, Petroecuador, (1999), y el ocurrido en el río Rosario (2000) (Tejada *et al.*, 2003). Debido a estos los hechos se evidenció la necesidad de evaluar el riesgo por derrame de hidrocarburos en la zona.

Para abordar este tema durante los últimos cinco años, el CCCP, con financiamiento de la Dirección General Marítima, DIMAR y el apoyo de Ecopetrol, condujo varios estudios para determinar la línea base que permitiera conocer cómo está constituida bahía y cuáles son los principales procesos que en ella se dan. Dichos estudios se concentraron en entender y describir los ecosistemas, incluidos sus competentes biótico y abiótico. Al interior de este último se analizó el comportamiento hidrodinámico de la bahía; el *hombre* que está asentado sobre su borde costero describiendo sus variables demográficas, el uso que le da al borde costero y su entendimiento y receptividad hacia la temática ambiental, y finalmente, el *contaminante* en sí. Es decir, ¿Cuáles serían las posibles fuentes de contaminación por hidrocarburos?, ¿Cuáles son las concentraciones actuales en varios puntos de la bahía?, ¿Cómo se manejan los hidrocarburos dentro de la bahía y cuáles son los principales riesgos de ese manejo?.

La información colectada fue introducida a un SIG, sistema que recientemente ha sido utilizado como una herramienta de trabajo para la evaluación de riesgos naturales como terremotos, huracanes, ciclones e inundaciones (Lavakare, 1997); en el caso particular que nos ocupa se utilizó para almacenar la información utilizada en la evaluación de riesgos; realizar interrelaciones espaciales, desplegar salidas y visualizar la distribución geográfica de los recursos naturales y de los posibles impactos en caso de un eventual derrame de hidrocarburos en la bahía de Tumaco.

ÁREA DE ESTUDIO

La bahía de Tumaco está localizada en el extremo sur del litoral Pacífico del departamento de Nariño, entre las latitudes 01° 37' y 02° 09' 30" Norte y las longitudes 79° 01' y 78° 26' Oeste, en cercanías a la frontera entre Colombia y Ecuador. Constituye la más grande entrada a lo largo de la costa colombiana con un área aproximada de 315000 hectáreas (Fig. 2).

METODOLOGÍA

Inicialmente se organizó la información disponible sobre la bahía de Tumaco en tres grandes áreas, a saber:

- Ecosistema:
 - * Componente biótico:
 - Cobertura vegetal
 - Fauna marina: fito, zoo e ictioplancton, bentos
 - * Componente abiótico:
 - Meteorología marina
 - Parámetros físico-químicos del agua de mar
 - Dinámica marina:
 - Mareas
 - Oleaje
 - Corrientes
 - Transporte de contaminantes
- Hombre:
 - * Demografía (ubicación de asentamientos, nivel educativo, salud, organización, etcétera)
 - * Usos del litoral y principales actividades económicas
 - * Normas y leyes
- Contaminante
 - * Tipo
 - * Concentración actual en aguas, sedimentos y organismos
 - * Tendencias
 - * Procesos que se dan al entrar en contacto con el agua de mar

Lo anterior sirvió de base para la evaluación del riesgo, el cual requirió de las siguientes etapas (Fig. 1.):

(i) Determinación de las fuentes de amenaza

Uno de los principios fundamentales de la evaluación de riesgos es que éste depende de su localización espacial y que puede, a su vez, ser evaluado dentro de un rango aceptable de incertidumbre, si se cuenta con información histórica y espacial adecuada.

Para la determinación de las fuentes de amenaza se tuvieron en cuenta los diferentes sitios de almacenamiento, distribución, manipulación y medios de transporte de hidrocarburos, los cuales al sufrir alguna falla o ruptura provocarían un derrame del mismo o de sus derivados (CCCP, 2002).

El procedimiento consistió en identificar y clasificar las diferentes fuentes de amenaza por derrame de hidrocarburos, basados en criterios como la frecuencia de los accidentes ocurridos, los procedimientos y medidas de seguridad tomadas para la manipulación, y la cantidad de crudo manipulado, entre otras. Debido a que los casos de derrames ocurridos en el pasado son muy escasos, la asignación de probabilidades a las diferentes fuentes de amenazas se dificulta, por lo que para ello se utilizó la tabla propuesta por el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP, 1999) para Ecopetrol, a saber:

ÍNDICE	CLASIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
1	Improbable	Un caso en 30 años
2	Remoto	Hasta un caso cada 30 años
3	Ocasional	Hasta un caso cada 20 años
4	Probable	Hasta un caso cada 5 años
5	Muy probable	Más de un caso al año

(ii)Elaboración del mapa de fuentes de amenaza por derrame

Las diferentes fuentes de amenaza fueron localizadas espacialmente con la ayuda del SIG, sobre un mapa base de la bahía conformando de esta manera, el mapa de fuentes de amenaza por derrame de hidrocarburos en la bahía de Tumaco (Fig. 2).

(iii)Zonificación por áreas de posible desplazamiento de la mancha

Por cada fuente de amenaza se realiza una zonificación que indique la mayor o menor probabilidad de desplazamiento de una mancha de hidrocarburos, para lo cual se tiene en cuenta la caracterización hidrodinámica del cuerpo de agua de interés. Dado que son varias las posibles fuentes de un derrame, se debe considerar su jerarquización de mayor a menor importancia, siendo ésta determinada por criterios como: cantidad de hidrocarburo manipulado, cercanía a áreas especialmente sensibles, tecnología involucrada, controles de seguridad, y tipo de hidrocarburo manipulado y frecuencia de los accidentes reportados.

En el caso de producirse un vertido de petróleo o de un hidrocarburo genérico en una zona estuárica y/o costera, los procesos predominantes son los de advección o arrastre de la superficie de la mancha debidos al empuje por corrientes, mareas, viento y oleaje. Estos determinarán especialmente la extensión del vertido y su efecto sobre el medio marino y costero (Comerma *et al.*, 2001).

El proceso de dispersión está gobernado por la ecuación de convección-difusión. Se trata de la expresión de la ecuación de conservación de la masa del hidrocarburo sobre la superficie del mar o ecuación euleriana del transporte (Espino *et al.*, 2002). El componente advectivo de la ecuación mencionada es:

$$\begin{cases} u_s = u + 0,03 \cdot U_x + W_x \\ v_s = v + 0,03 \cdot U_y + W_y \end{cases}$$

donde,

u_s, v_s	velocidad de arrastre de la mancha superficial (m/s)
u, v	velocidad de las corrientes marinas superficiales debidas al viento y a las mareas (m/s)
U_x, U_y	velocidad del viento a 10 m. sobre la superficie del mar (m/s)
W_x, W_y	empuje debido al oleaje (m/s)

Teniendo en cuenta que la magnitud de u, v es mucho mayor que la de W_x, W_y y que del valor de la velocidad del viento sólo se toma el 3% de su intensidad, es claro suponer que el factor más importante para determinar la dirección de desplazamiento de una mancha de hidrocarburos sea la marea. Adicionalmente y de acuerdo con los

experimentos realizados se determinó que no sólo es importante saber si está en flujo o reflujo, sino si se encuentra en sicigia o cuadratura. Esto último debido a que la intensidad de las corrientes varía en promedio de 1 a 0.4 m/seg y puede llegar a ocasionar cambios significativos en la trayectoria de la mancha.

Con los resultados de dichos experimentos se efectuó una zonificación de la bahía, determinando áreas con mayor o menor probabilidad de tránsito de una mancha, para lo que se tuvo en cuenta que el caso de marea en sicigia sólo tiene una duración de dos días, luego de los cuales el rango de marea va decreciendo hasta llegar a la situación de cuadratura, que posteriormente comienza a incrementarse hasta llegar a la condición de sicigia nuevamente. Este ciclo se repite cada catorce días aproximadamente (Fig. 3). Se puede afirmar que la condición de sicigia es extrema y por tanto de menor probabilidad, siendo más probables las condiciones intermedias.

Según lo anterior se definieron zonas de alta, media, baja y nula probabilidad de desplazamiento de una mancha de hidrocarburos proveniente del terminal boyero de Ecopetrol, tal como se aprecia en la Figura 4 para el caso de marea en cuadratura y Figura 5 para marea en sicigia.

(iv) Determinación de la vulnerabilidad

En la definición de la vulnerabilidad se consideraron factores biológicos, geomorfológicos, de usos del litoral y dinámicos. Utilizando información de cartografía base digital de la bahía se elaboró el mapa de Índices de Sensibilidad Ambiental, ISA, siguiendo la metodología propuesta por la National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA, en la cual se clasifican los diferentes tipos de costa según su sensibilidad a los derrames de hidrocarburos (Fig. 6).

La vulnerabilidad se estableció, en primer lugar, determinando para cada uno de los recursos o ecosistemas estudiados el grado de sensibilidad y capacidad de adaptación individual natural al derrame y, en segundo lugar, agrupando por zonas a aquellos elementos con mayor vulnerabilidad individual con el fin de obtener zonas de vulnerabilidad a lo largo y ancho de la bahía.

Para la elaboración del análisis de vulnerabilidad se deben tener en cuenta las consecuencias, entre las que se incluyen:

- Pérdida de vidas
- Afectación al ambiente
- Pérdidas económicas
- Afectación a la operación
- Deterioro de la imagen
- Incumplimiento de regulaciones (ICP, 1999).
- Sensibilidad del sistema al desajuste o evento
- Capacidad de adaptación

La escala de vulnerabilidad individual adoptada presentó seis niveles: muy alta, alta, media alta, media baja, baja y muy baja. La vulnerabilidad alta incluye los recursos o ecosistemas que por sus condiciones y características intrínsecas son muy sensibles a los cambios externos causados por las propiedades físicas y químicas del hidrocarburo derramado y, además, poseen una baja capacidad de adaptación a estos cambios, (Tabla 1). Por su parte, la vulnerabilidad media corresponde a una sensibilidad moderada a los cambios y a una adecuada capacidad de adaptación. Finalmente, la vulnerabilidad baja comprende los recursos y ecosistemas poco sensibles a los cambios y poseen una alta capacidad de adaptación.

Superponiendo las capas correspondientes a cada recurso cartografiado, con la ayuda del SIG y agrupando por vulnerabilidades comunes se obtuvo el Mapa de Vulnerabilidad de Recursos en la Bahía de Tumaco por Efecto de un Potencial Derrame de Hidrocarburos desde la Estación de Ecopetrol (Fig. 7).

(v) Evaluación del riesgo

Se sabe que el riesgo es una relación entre la probabilidad de ocurrencia de un peligro o amenaza y la vulnerabilidad del entorno afectado por dicha amenaza, determinado a partir de los criterios seleccionados. Para el presente caso se seleccionaron dos escenarios extremos relacionados con la situación en sicigia y cuadratura.

Para la evaluación del riesgo en sicigia se superpusieron, mediante el SIG, las capas de información correspondientes al mapa de clasificación de áreas por desplazamiento de una mancha en sicigia y el de vulnerabilidad ante un derrame de hidrocarburos de la bahía de Tumaco. Una vez establecida la escala cualitativa de valoración del riesgo, a través de las funciones del SIG, se efectuó la superposición o cruce topológico de las dos capas de información y se reclasificaron las zonas resultantes de forma manual, asignándole un identificador y color diferente a cada una, correspondiente a uno de los valores establecidos en la escala de valoración (muy alto riesgo, alto riesgo, riesgo medio, riesgo bajo, muy bajo riesgo y sin riesgo). De esta manera se obtuvo el Mapa de Riesgos por Derrame de Hidrocarburos desde la Estación de Ecopetrol en la Bahía de Tumaco para el Período de Sicigia (Fig. 8). Para el escenario de marea en cuadratura se siguió el mismo procedimiento (Fig. 9).

RESULTADOS

Fuentes de amenaza

Las principales fuentes de amenazas de derrame de hidrocarburos y sus derivados identificados en la bahía de Tumaco fueron:

1. Derrames invisibles:

Hace referencia a los pequeños derrames de hidrocarburos ocurridos constantemente, difíciles de cuantificar o de ubicar, provenientes de las embarcaciones pequeñas que transitan dentro de la bahía y en sus inmediaciones, las cuales arrojan pequeñas cantidades de combustible al mar o los desechos de los cambios de aceite de sus motores fuera de borda, sin ser concientes del daño que causan.

Para su ubicación se seleccionaron los sitios de alto tráfico marítimo y los puntos de concentración de este tipo de embarcaciones en los alrededores de las islas que conforman Tumaco (Fig. 10). En el presente estudio no se realizaron estimativos que cuantificaran la importancia relativa de este tipo de vertido.

2. Terminal petrolero:

En la bahía de Tumaco opera el Terminal Petrolero de Ecopetrol, ubicado a 8 km de la costa, conectado por una tubería de 36" de diámetro y una longitud de 6.8 km, terminada en un manifold de distribución, con capacidad para conectar tres mangueras de 12", a 30 m de profundidad en marea alta (Fig. 11).

3. Derrames continentales:

Esta amenaza está representada por posibles derrames en el oleoducto que afecten áreas terrestres, pues dada la configuración topográfica del terreno podrían llevar el hidrocarburo derramado a zonas costeras de la bahía de Tumaco. Pueden ocurrir por manipulación indebida de las válvulas de cierre, por atentados terroristas o por siniestros de origen natural que afecten las tuberías (Fig. 12).

4. Buques en tránsito:

Hace referencia a los buques que se encuentran en tránsito en aguas colombianas y pasan por fuera de la bahía de Tumaco, por lo general son buques provenientes de otros puertos suramericanos que navegan en dirección hacia el canal de Panamá, los cuales podrían sufrir desperfectos o accidentes y derramar hidrocarburos.

5. Derrames ocurridos en Ecuador:

Se refiere a los derrames causados en territorio ecuatoriano y que por la dinámica oceánica pueda alcanzar las costas de la bahía.

De estas fuentes se seleccionó la del Terminal Boyero de Ecopetrol para desarrollar la evaluación, teniendo en cuenta que es la que reviste mayor peligro para la bahía de Tumaco, por la cantidad de hidrocarburo que podría derramarse, la cercanía a áreas muy sensibles y la alta disponibilidad de información existente.

Descripción de la vulnerabilidad

Los asentamientos humanos identificados correspondieron a las zonas pobladas de las islas de Tumaco y El Morro, el casco urbano del municipio de Tumaco y 25 asentamientos costeros localizados a lo largo de la costa, desde Cabo Manglares hasta el sector de la bocana Hojas Blancas, en el departamento de Nariño.

De otra parte, las zonas turísticas identificadas fueron las playas públicas de la isla de Bocagrande, al suroriente de la bahía, y las playas de la isla El Morro, en el sector del Morrito y playa del Morro.

En lo relacionado con la pesca se identificaron la zona de pesca artesanal de mayor productividad correspondiente a las inmediaciones de Chajal, que comprende la bahía interna, entre las poblaciones de Curay y Chajal. Dentro de esta categoría también se

encuentran la zona de pesca artesanal de media y baja productividad comprendida desde la isla de Vaquería hasta punta Cascajal y punta Laura, conformando un área de tipo cónico; y las zonas de recolección de piangua ubicadas en cercanías de las islas de Bocagrande, Vaquería, Tumaco, El Morro y en las proximidades de las poblaciones de Curay y Salahonda. También se incluyeron en esta categoría las áreas destinadas a la acuicultura (camaroneras y cultivos de peces, principalmente), ubicadas en la parte suroccidental de la bahía, entre el estero Agua Clara y la boca Purún, cerca a Cabo Manglares.

En relación con los aspectos biológicos se puede afirmar que el principal factor que influye en la magnitud de los efectos sobre los recursos biológicos es la movilidad. Así, organismos con una menor movilidad que la de la mancha del hidrocarburo se verán afectados, tal es el caso del bentos y el plancton, y el manglar. Se espera que el efecto de los hidrocarburos sobre los organismos con mayor movilidad sea transitorio, mientras se recupera el hidrocarburo derramado y los organismos puedan regresar a su hábitat normal.

En términos generales, los recursos biológicos potencialmente afectables por un derrame en la bahía serían las poblaciones fitoplanctónicas, localizadas en la zona de alta productividad ubicada en la parte interna de la bahía, entre punta Laura y la población de Trujillo, las cuales se verían afectadas por la disminución de entrada de luz, que incidiría directamente en el proceso de su fotosíntesis. Igual afectación sufrirían las comunidades fitoplanctónicas localizadas en zonas de media (entre punta Laura y las inmediaciones de Trujillo, con una ancho hacia mar abierto de 14 km aproximadamente) y baja productividad (entre punta Laura y punta Cascajal).

Las zonas de manglar, altamente productivas, también se verían afectadas por la disminución de la diversidad de especies presentes. Estas zonas están ubicadas al sur de la bahía, entre las poblaciones de La Caleta y Cabo Manglares; los organismos bentónicos de fondos blandos, ubicados hacia la parte interna de la bahía, pueden verse afectados en su reproducción y ciclos de vida por efectos del derrame; además de las zonas de desove de la mayor cantidad de especies ubicadas en las inmediaciones de la población de Llanaje y el estero del mismo nombre en la parte norte de la bahía.

Con la aplicación de los ISA en la bahía de Tumaco se encontraron cuatro tipos de litorales, a saber:

- **ISA = 1**, correspondiente a orillas rocosas expuestas o acantilados, ubicados entre la desembocadura del río Colorado y la isla del Gallo, así como el islote rocoso ubicado al Este de la isla de El Morro.
- **ISA = 3** o playas de arena fina, que comprende los sectores de playas activas y cordones litorales no vegetados, ubicados principalmente en las islas de El Morro, Tumaco, Vaquería y Bocagrande; estas se caracterizan por poseer un substrato semipermeable, compacto con arena de grano medio a fino, lo cual inhibe la

penetración del hidrocarburo (normalmente menor de 10 cm), minimizando así la cantidad de sedimentos afectados (CCCP, 2003).

- **ISA = 7** o planos de marea expuesto, que corresponde a las áreas descubiertas durante la marea baja, cuyo substrato es de arena fina poco consolidado y muy permeable. Se encuentran a lo largo de toda la bahía de Tumaco y en los sectores de las bocanas. Los sedimentos son saturados de agua, lo que hace que la penetración del hidrocarburo sea muy limitada.
- **ISA = 10**, conocidos como manglares y pantanos de agua salobre, correspondientes a las planicies de marismas, dominantes desde el estero Guandarajo hasta el río Colorado, así como también en algunos sectores entre los acantilados de la bahía de Tumaco y los cordones litorales recientes, ubicados al Sur de la isla de Tumaco, sobre los cuales se ha establecido vegetación manglárica (CCCP, 2003).

Con base en todo lo anterior se determinó el grado de vulnerabilidad, estableciéndose una zona de muy alta vulnerabilidad localizada en la parte sur de la bahía, entre las poblaciones de Vaquería (Colombia Grande) y el estero Resurrección, y entre la isla de El Morro y la población de Inguapi del Carmen. Se le dio esta clasificación debido a que incluyó doce asentamientos humanos, las playas turísticas de El Morro y Bocagrande, explotaciones acuícolas, algunos sitios de recolección de piangua y una vasta extensión de bosques de manglar; todos ellos elementos del alta vulnerabilidad individual, la cual sumada a la cercanía de la estación de Ecopetrol le confieren un carácter de muy alta vulnerabilidad a esta zona.

Otra zona establecida fue la de alta vulnerabilidad, localizada entre punta Laura, la bocana del río Mejicano y las inmediaciones de la población de Trujillo; incluye cuatro asentamientos humanos, la zona de alta productividad fitoplanctónica y de organismos bentónicos, gran parte de la zona de pesca de alta productividad, algunos sitios de recolección de piangua y parches de manglar. Como se observa en la Tabla 1, estos recursos y ecosistemas presentan vulnerabilidad individual alta, razón por la cual se clasificó como tal.

La zona de media alta vulnerabilidad comprendió, a su vez, tres zonas a lo largo de la bahía. Una primera localizada en la parte suroccidental, desde Papayal hasta Cabo Manglares, la cual comprende cuatro asentamientos humanos costeros, una explotación acuícola y una amplia franja de bosques de manglar en toda su longitud. Pese a la alta vulnerabilidad individual de sus componentes, se clasificó como de media alta, debido a que no incluye gran cantidad de asentamientos humanos, ni zonas de alta productividad biológica. La segunda de estas zonas se encontró al Sur de la bahía, entre el estero Resurrección y la desembocadura del río Tablones. Comprende cuatro asentamientos humanos costeros y una importante extensión de bosques de manglar y esteros. Aunque incluye ecosistemas de alta vulnerabilidad individual, se ha clasificado como de media alta, debido a que en el caso de un eventual derrame el efecto de éste sobre la zona podría verse disminuido por la disposición espacial de las islas de Tumaco y El Morro, las cuales actuarían como barreras para la mancha. La última de las zonas de esta categoría se encontró al Norte, entre punta Cascajal y la bocana Hojas Blancas; incluye cuatro asentamientos humanos, un sector de acantilados en

punta Cascajal y una buena cantidad de bosques de manglar. Su clasificación de media alta vulnerabilidad está dada por la alta vulnerabilidad individual de sus ecosistemas y por la distancia considerable con respecto a la fuente del derrame, lo que le conferiría una condición de medianamente vulnerable.

De otro lado, la zona de media baja vulnerabilidad comprende aquellos recursos cuya vulnerabilidad individual es media y baja. Corresponde a una zona sobre el mar en forma de cono cuyo vértice se localiza en cercanías a la desembocadura del río Llanaje y su base se extiende desde la parte suroriental de la isla de El Morro hasta las cercanías de la población de Trujillo. Ésta es la mayor zona de desove de toda la bahía, una parte de las zonas de pesca artesanal de alta y media productividad, y las zonas de media y baja productividad fitoplanctónica.

La zona de baja vulnerabilidad se encontró localizada hacia la parte nororiental de la bahía, desde la población de Salahonda hasta Soledad; comprende el sector de acantilados de punta Laura, una gran extensión de bosques de colina, un pequeño reducto de bosque de manglar y algunos asentamientos humanos. Se clasifica como de baja vulnerabilidad ya que la condición individual de sus componentes en su mayoría es baja y se encuentra a una distancia considerable de la posible fuente del derrame.

Por último, la zona de muy baja vulnerabilidad incluyó las zonas de baja productividad fitoplanctónica y pesquera, zonas éstas con baja vulnerabilidad individual, lo que permite asignar un nivel de muy baja afectación a los recursos que en ella se encuentran. Localizada hacia el límite exterior de la bahía, en la zona comprendida entre las islas de El Morro, La Viciosa, punta Cascajal y el canal de Salahonda.

Evaluación del riesgo por derrame

Al efectuar la superposición con el SIG, resultaron 24 clases de riesgo. Con el fin de simplificar, se efectuó un agrupamiento por afinidad, reduciéndose a seis clases (muy alto, alto, medio, bajo, muy bajo y sin riesgo) ver [Tabla 2](#).

DISCUSIÓN

Desde el punto de vista teórico, el riesgo se define en términos generales como: “La probabilidad de ocurrencia de unas consecuencias sociales, económicas o ambientales en un sitio particular y durante un tiempo de exposición determinado. Se obtiene de relacionar la amenaza con la vulnerabilidad de los elementos expuestos” (Degepad, 2001). De acuerdo con esta definición se tiene que el riesgo disminuye si se controla la amenaza y se disminuye la vulnerabilidad; de lo contrario aumenta a medida que las amenazas y vulnerabilidades sean mayores.

El riesgo puede ser definido también como el producto de una amenaza o peligro por una vulnerabilidad. La vulnerabilidad, por su parte, se define como el factor de riesgo interno de un sujeto o sistema expuesto a una amenaza, correspondiente a su predisposición intrínseca a ser afectado o de ser susceptible a sufrir una pérdida. En

otras palabras, la vulnerabilidad se puede definir como el grado en que un sistema natural o social podría resultar afectado por un evento y depende de la sensibilidad de un sistema a los cambios impuestos por la amenaza, incluidos los efectos beneficiosos y perjudiciales, y su capacidad para adaptarse a los cambios.

El presente trabajo se enmarcó dentro del concepto general de la evaluación o análisis de riesgos ecológicos, al entenderse como un “proceso científico para estimar la probabilidad de que ocurra un efecto ecológico adverso para la integridad de ecosistemas naturales y los servicios que ellos proveen, como resultado de la exposición a estresantes relacionados con la actividad humana” (Puig, 2002).

En términos generales, la metodología planteada se orienta, dentro de su carácter multidisciplinario, hacia la utilización de una metodología sencilla de entender y de aplicar, con la asistencia de la herramienta informática del SIG, lo que posibilita un soporte técnico para la información utilizada por los tomadores de decisiones en el caso de los derrames de hidrocarburos.

El usuario directo de la metodología aquí planteada y sus resultados es Ecopetrol. Con la información de los resultados obtenidos podrá concebir, diseñar e implementar el plan de acción para la atención de emergencias por derrame de hidrocarburos y planificar el trabajo de los grupos de control de derrames, al contar con información detallada sobre las áreas más vulnerables y en riesgo, y las posibles direcciones de la mancha una vez.

La aplicabilidad de esta metodología de evaluación del riesgo se puede considerar amplia, en el sentido que puede ser aplicada a otros ambientes costeros con condiciones naturales e hidrodinámicas similares a las presentes en la bahía de Tumaco. No obstante, contando con los instrumentos de medida (boyas de deriva), información temática y el SIG, puede ser aplicada en ambientes costeros del Caribe colombiano, con los ajustes y modificaciones que las condiciones naturales e hidrodinámicas de la zona le impongan.

En el caso de derrames continentales, es decir, ocurridos en tierra y que por condiciones topográficas pudiesen llegar a la bahía de Tumaco su estudio y seguimiento puede realizarse utilizando herramientas informáticas como el software Acoplan, desarrollado por el ICP, que facilita la toma de decisiones en el caso de derrames ocurridos en la parte continental.

Es de anotar que en estudios anteriores ya se habían determinado concentraciones altas, aunque no por encima del valor límite establecido por la NOAA para sedimentos ($3.9 \mu\text{g/g}$) de hidrocarburos aromáticos totales disueltos/dispersos en las zonas del Puente El Pindo y en las boyas de Ecopetrol de la bahía de Tumaco (Marrugo, 1990). Asimismo, en la Evaluación del Impacto por Derrames de Hidrocarburos en la Ensenada de Tumaco (Cabrera y Reyna, 1997), en la cual se estudió la evolución del derrame del tanquero griego Daedalus en la estación de Ecopetrol en el año 96, aunque no se utilizó la metodología empleada en la presente evaluación, se hallaron resultados similares en lo que respecta al desplazamiento de la mancha y se señaló, igualmente, a la marea como uno de los factores determinantes en la evolución del desplazamiento.

La evaluación del riesgo efectuada permite afirmar que en el caso de darse un derrame en la estación de Ecopetrol estando la marea en cuadratura se dispondrá de mayor tiempo de reacción para tomar las medidas de prevención y salvaguarda de la vida humana, los recursos biofísicos y los bienes materiales, por cuanto la mayor probabilidad de desplazamiento de la mancha se presenta hacia la parte norte de la bahía, entre punta Laura y la bocana de Hojas Blancas (zona de alta amenaza). Área que se encuentra a una distancia aproximada de 20 km, desde el punto de derrame en la estación.

No obstante, si el derrame sucede en sicigia y en la fase de flujo se tendrá menor tiempo de reacción y mayor área en riesgo muy alto y alto (sectores en color rojo y naranja comprendidos entre el estero Agua Clara y punta Laura), debido fundamentalmente a que la mayor probabilidad de desplazamiento de la mancha se da hacia la parte sur de la bahía, sector de las isla de El Morro y las poblaciones de La Florida, Cocalito y Resurrección.

La parte suroccidental de la bahía no presenta riesgo por un eventual derrame en la estación de Ecopetrol, debido fundamentalmente a su posición geográfica con respecto a la estación y a las condiciones de marea de la zona, que hacen muy poco probable que la mancha se desplace hacia a este sector.

La presente metodología puede ser mejorada en la parte correspondiente a la clasificación de áreas por desplazamiento de la mancha, incorporándole un tratamiento estadístico y probabilístico, que permita contar con un sustento técnico para la determinación y trazado de los límites de estas zonas. Dicho tratamiento permitirá contar con información más precisa y debidamente sustentada, que a la vez redundará en información más precisa y confiable sobre las zonas en riesgo.

Un aspecto importante a tener en cuenta para la efectividad de la metodología utilizada es la capacitación que debe impartirse al personal que opera el SIG; especialmente en los aspectos relacionados con evaluación de riesgos, amenazas, vulnerabilidad y, en general, con la gestión del riesgo. Esto permitirá comprender mejor los conceptos y la metodología empleada, y optimizar los recursos que provee el SIG.

Para concluir, la metodología utilizada en el presente estudio permite mejorar la información científica y técnica disponible para los tomadores de decisiones, en cuanto a la identificación y representación espacial de los recursos amenazados, las fuentes de amenaza y los niveles de riesgo (Mansor, Shatri and Tuan, 1998), con miras al establecimiento de prioridades de actuación, medidas de control, seguimiento y posterior evaluación de los programas de control de riesgo en caso de un derrame de hidrocarburos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cabrera, E. y J. Reyna. 1997. Evaluación del Impacto por Derrames de Hidrocarburos en la Ensenada de Tumaco. Comprobación de la Efectividad de los Planes de Contingencia. Boletín Científico CCCP. San Andrés de Tumaco : CCCP, Colombia, No. 6, pp 139 -145.

Centro Control Contaminación del Pacífico. 2002. Monitoreo de las Condiciones Físicas, Químicas, Biológicas y del Comportamiento de Hidrocarburos en la Bahía de Tumaco (fase V). Informe técnico. San Andrés de Tumaco : CCCP, Colombia.

Centro Control Contaminación del Pacífico. 2003. Aportes al Entendimiento de la Bahía de Tumaco, Entorno Oceanográfico, Costero y de Riesgos. Serie Publicaciones Especiales. Ed. DIMAR. San Andrés de Tumaco, Colombia, Vol. 2, pp 143-146.

Comerma, E., M. Espino, M. González y M. Hernández. 2001. Una Herramienta Numérica para la Predicción de la Contaminación Marina por Vertido de Hidrocarburos. Aplicación en el Puerto de Bilbao. VI Jornada de Ingeniería de Costas y Puertos, J. Ed. Tintoré, Palma de Mallorca, España, pp 247-248.

Dirección General para la Prevención y Atención de Desastres. 2001. Plan Nacional para la Prevención y Atención de Desastres. Dgpad. Olitocompu Ltda., Bogotá , 60 pp.

Espino, M., E. Comerma, M. González y A. Arcilla. 2002. La Predicción de la Contaminación Marina por Vertido de Hidrocarburos en la Ingeniería Portuaria. Universidad Politécnica de Cataluña, España.

Lavakare, A. GIS and Risk Assessment. [en línea].

URL: <http://www.rmsi.com/PDF/gis&riskassessment.pdf> [Consulta: 1 de Septiembre de 2002]

Instituto Colombiano del Petróleo. 1999. Memorias Taller Manejo de Crisis en la Atención a Emergencias Mayores en Campos de Producción de Hidrocarburos. ICP. Bogotá, Colombia.

Mansor, Shatri y Tuan. 1997. Remote sensing and GIS Applications in Oil Spills Risk Assessment. [en línea] URL: <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/1998/ts3/ts3003pf.htm> [Consulta: 1 de Septiembre de 2002].

Marrugo, A. 1990. Estudio de la Contaminación Marina por Hidrocarburos en el Litoral Sur Pacífico Colombiano. Boletín Científico CCCP. San Andrés de Tumaco : CCCP, Colombia, No.1, pp 41-54.

Puig, A. 2002. Evaluación del Riesgo Ecológico. Breve Enciclopedia del Ambiente [en línea]. URL: <http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/RiesgoEcol.htm> [Consulta: 20 de Marzo de 2002].

TABLAS Y FIGURAS

Información Base

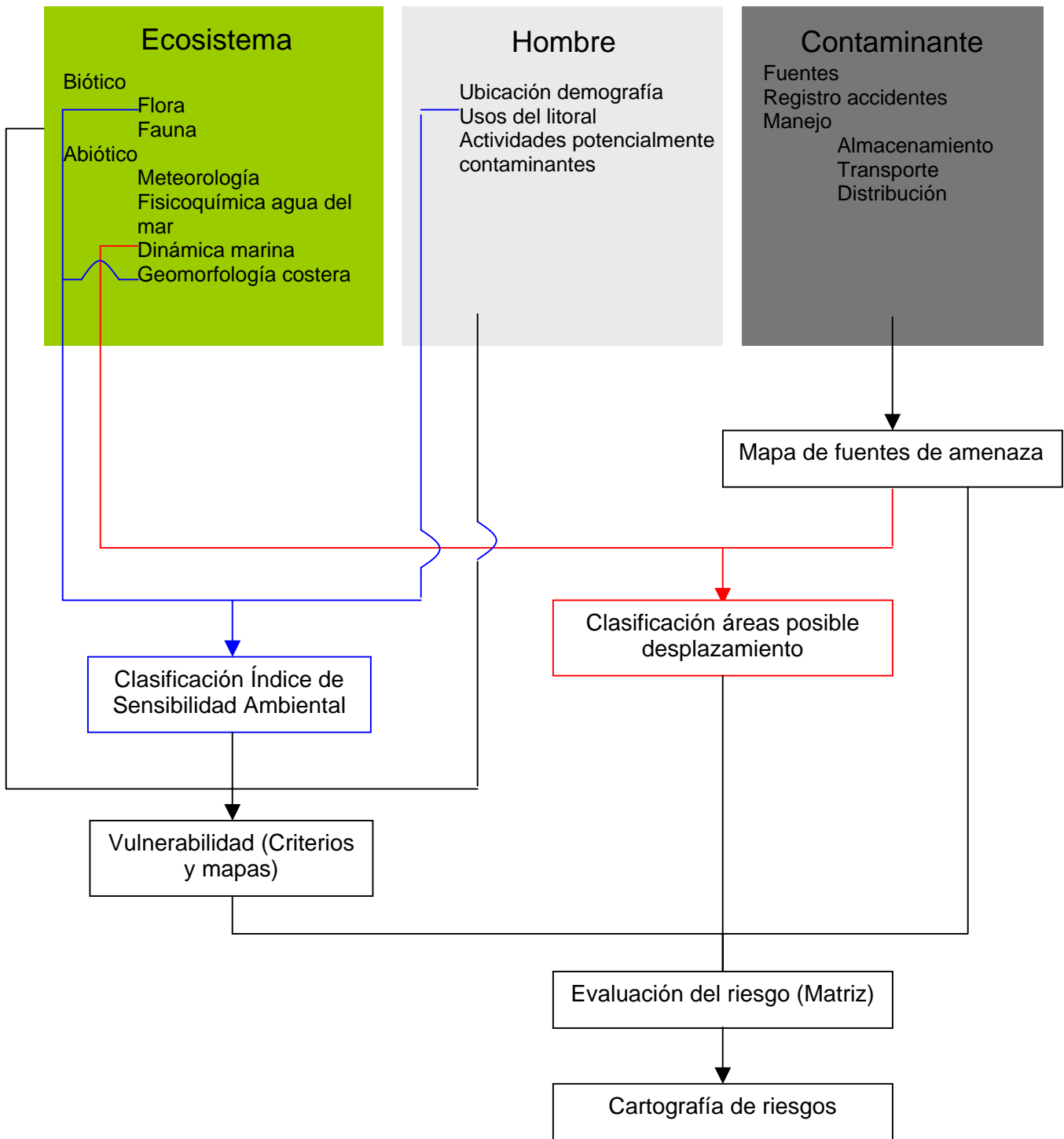


Figura 1. Esquema metodológico para la evaluación del riesgo.

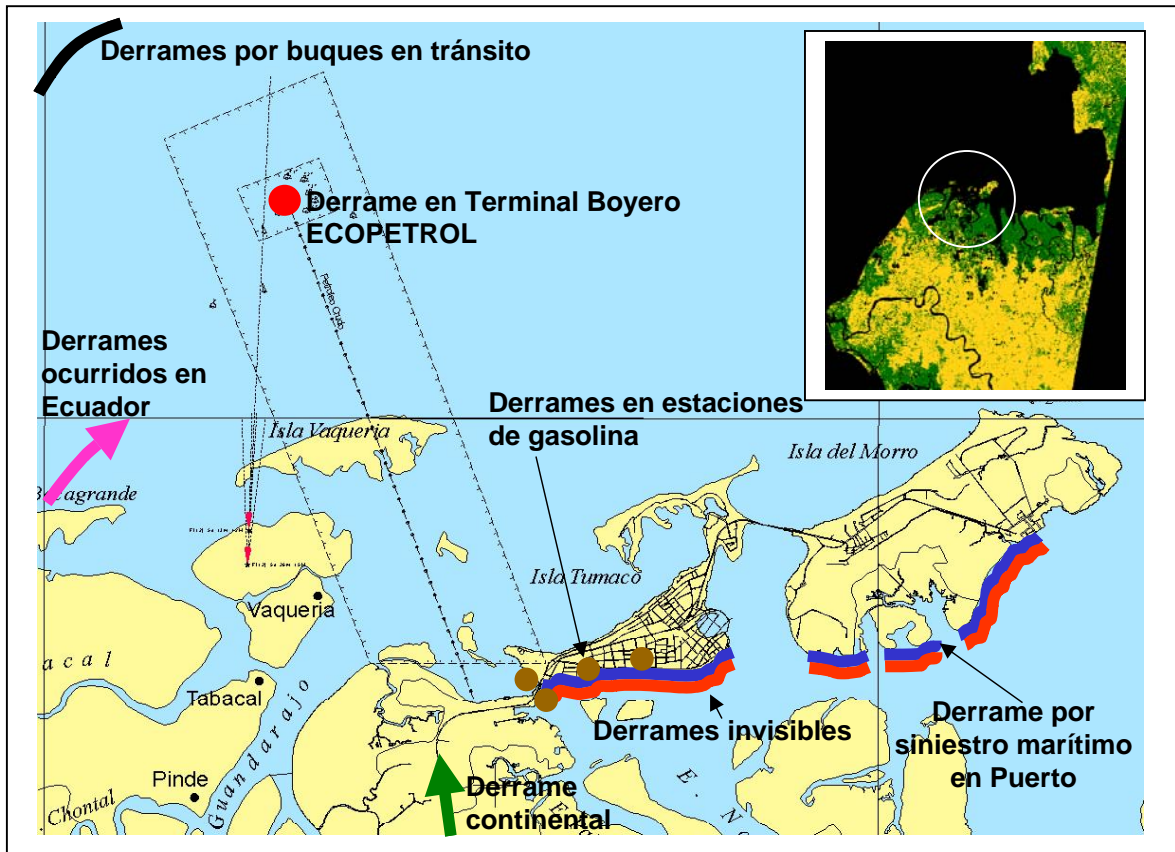


Figura 2. Posibles fuentes de derrame de hidrocarburos: siniestros en puerto (azul), invisibles (azul), ocurridos en Ecuador (fucsia), terminal Ecopetrol (círculo rojo) y continentales (verde). Arriba a la derecha se observa una imagen SPOT de 1994 para ubicación general del área de estudio. La zona encerrada dentro del círculo corresponde al área representada en la figura.

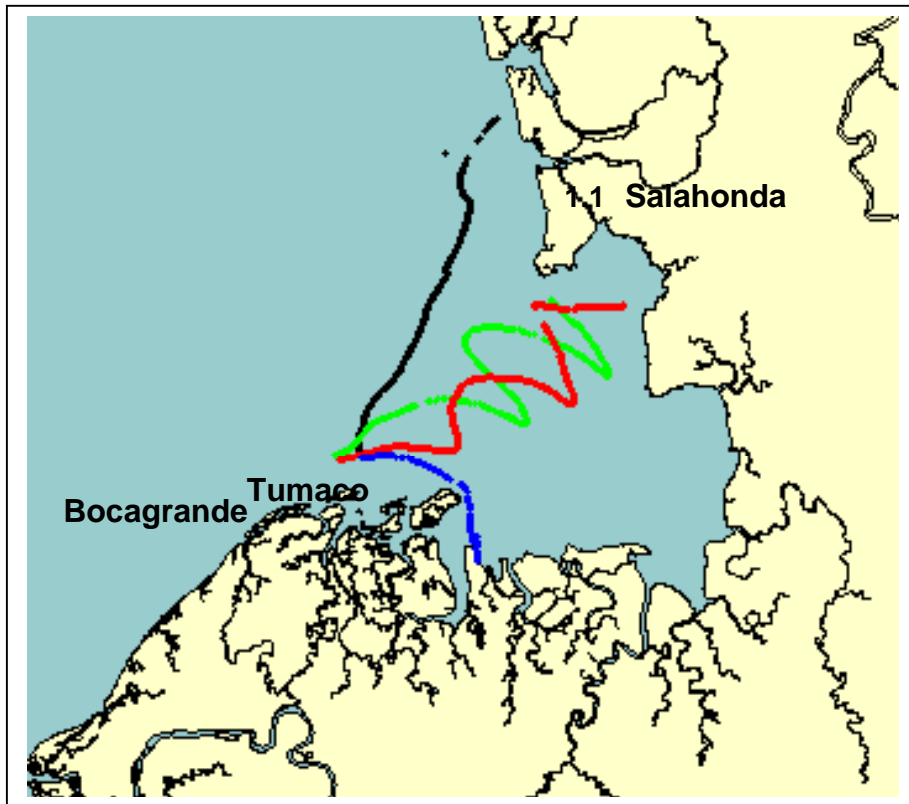


Figura 3. Trayectoria de las boyas digitales. En color negro, trayectoria en cuadratura con marea alta; en color verde, trayectoria en sicigia con marea alta; en color rojo, trayectoria en cuadratura con marea baja y en color azul, trayectoria en sicigia con marea baja.

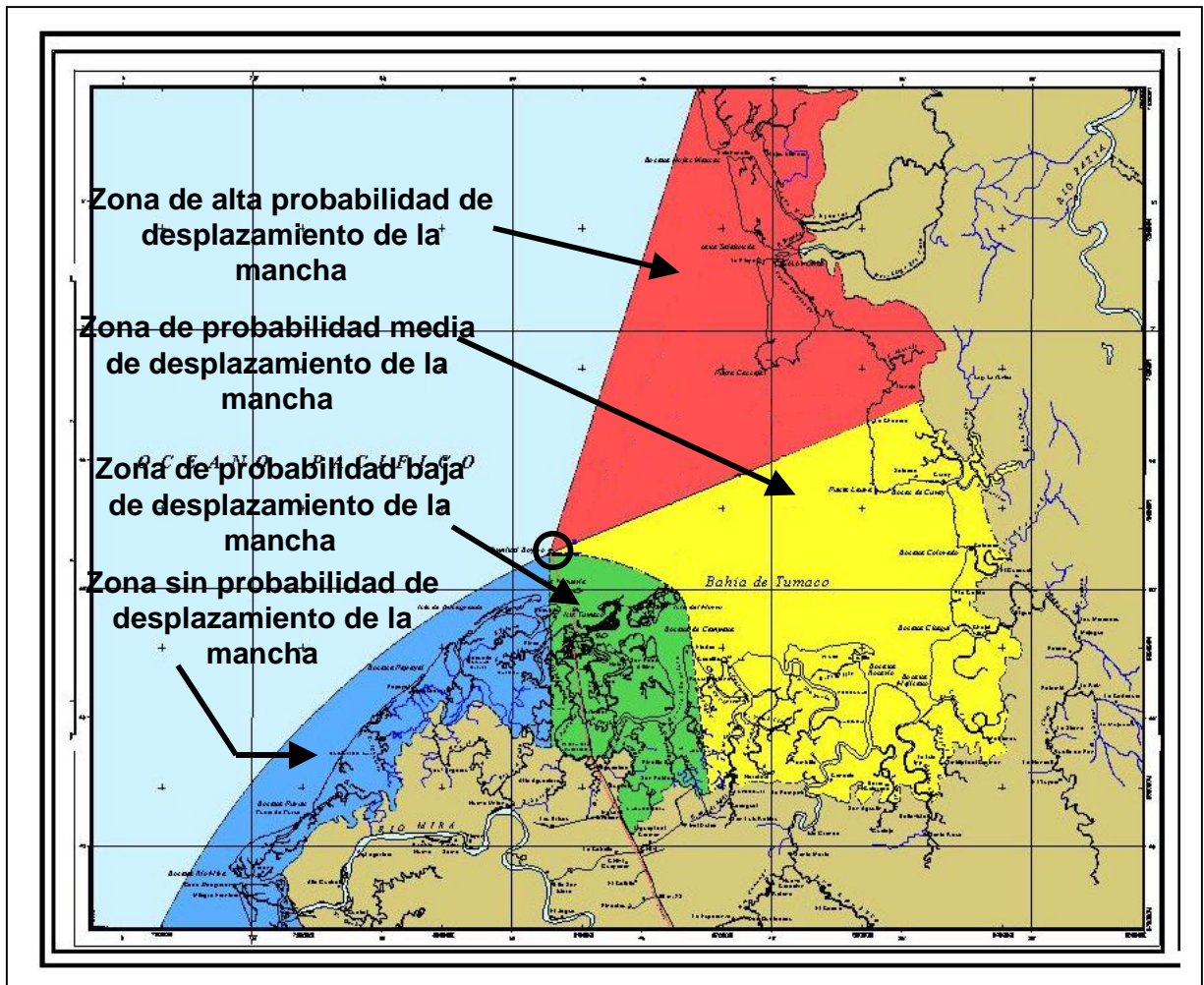


Figura 4. Mapa de Clasificación de Áreas por Posible Desplazamiento de la Mancha de Hidrocarburos en Cuadratura.

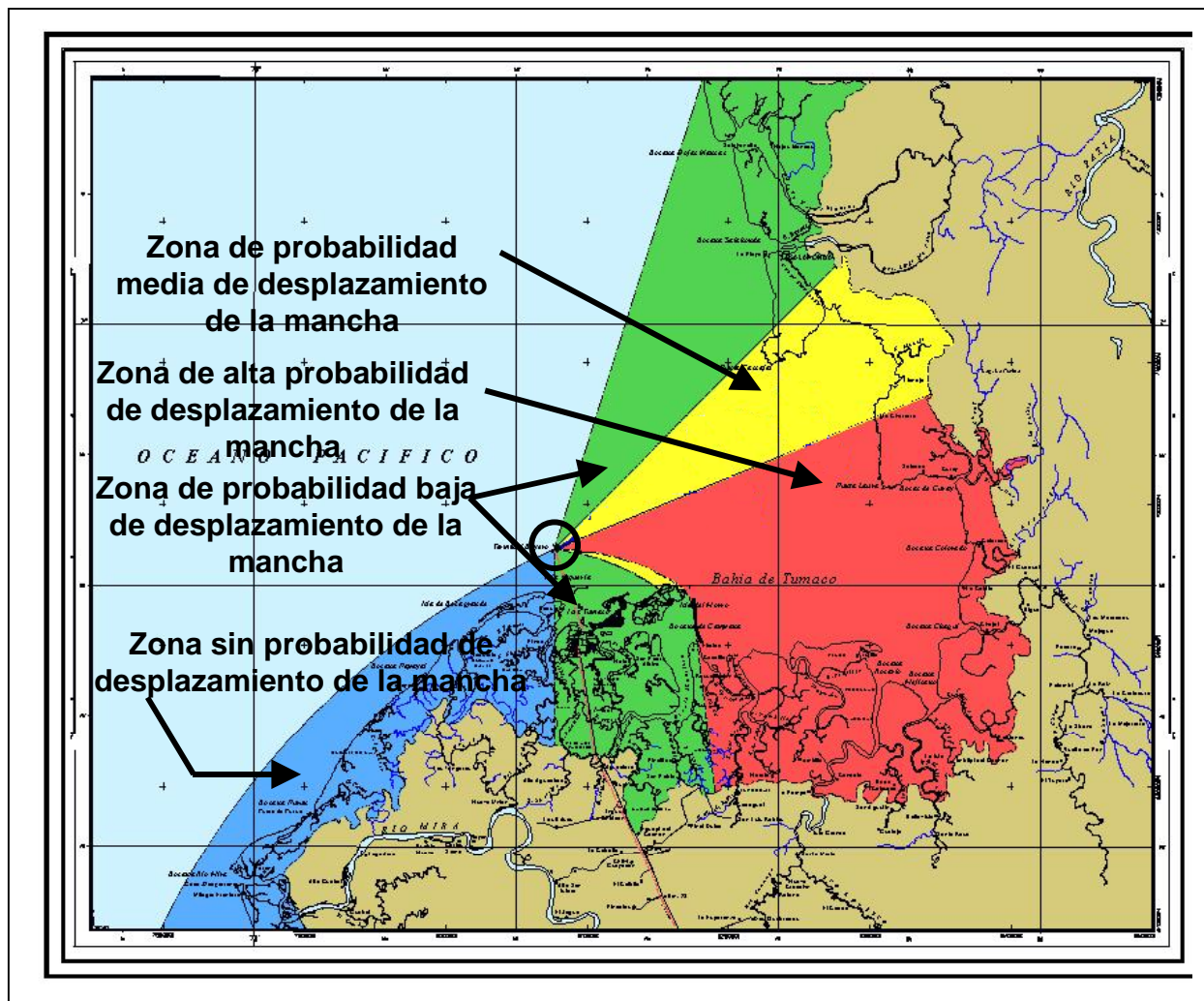


Figura 5. Mapa de Clasificación de Áreas por Posible Desplazamiento de la Mancha de Hidrocarburos en Sicigia.

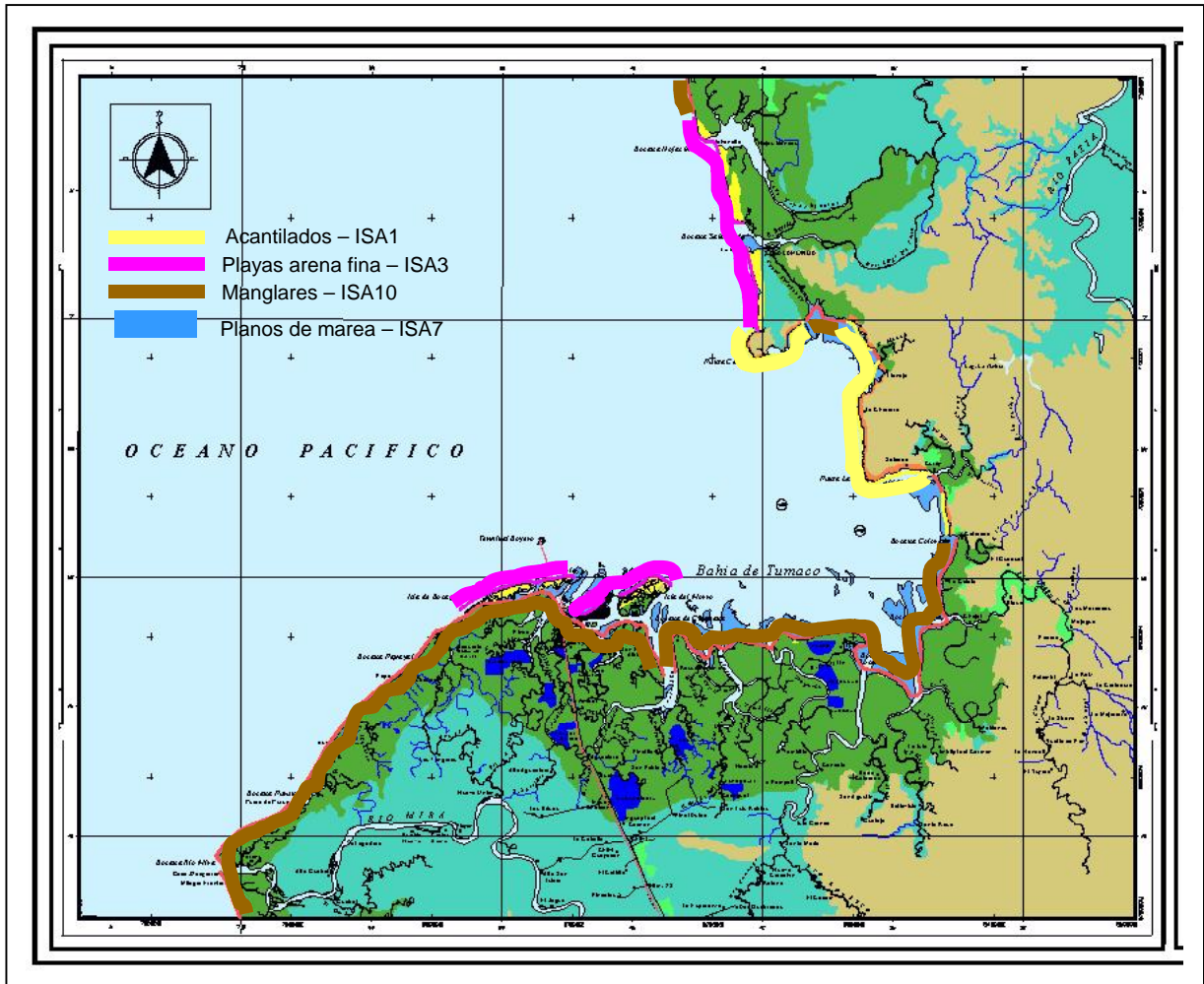


Figura 6. Mapa de los ISA para la Bahía de Tumaco por Derrame de Hidrocarburos.

Tabla 1. Grado de vulnerabilidad individual de los principales recursos y ecosistemas presentes en la bahía de Tumaco.

Vulnerabilidad individual	Recurso o ecosistema
Alta	Zonas de recolección de piangua
	Áreas destinadas a la acuicultura
	Zona de pesca artesanal de alta productividad (Chajal)
	Poblaciones de la zona de alta productividad fitoplanctónica
	Zonas de desove
	Áreas de turismo (playas)
	Planos de marea expuestos
	Zonas de manglar
	Zonas de asentamientos humanos (palafíticos)
	Media
Zona de pesca artesanal de media productividad	
Baja	Zona de baja productividad fitoplanctónica
	Zona de pesca artesanal de baja productividad
	Acantilados

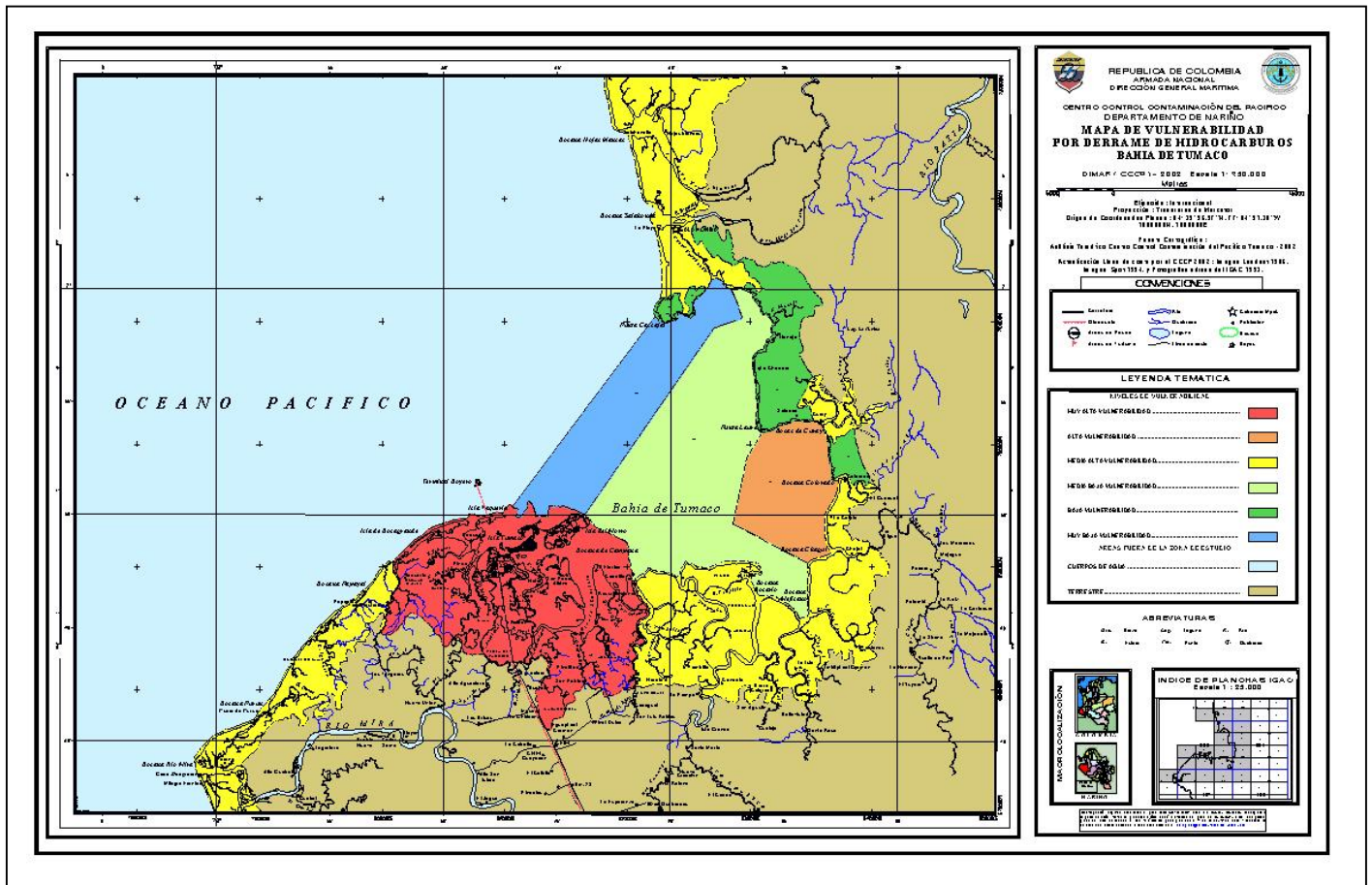


Figura 7. Mapa de Vulnerabilidad ante un Eventual Derrame de Hidrocarburos en la Bahía de Tumaco. En color rojo, la zona de muy alta vulnerabilidad; en naranja, la zona de alta vulnerabilidad; en amarillo, la zona de vulnerabilidad media alta; en verde claro, la zona de vulnerabilidad media baja; en verde oscuro, el área de baja vulnerabilidad, y en azul, el área de muy baja vulnerabilidad.

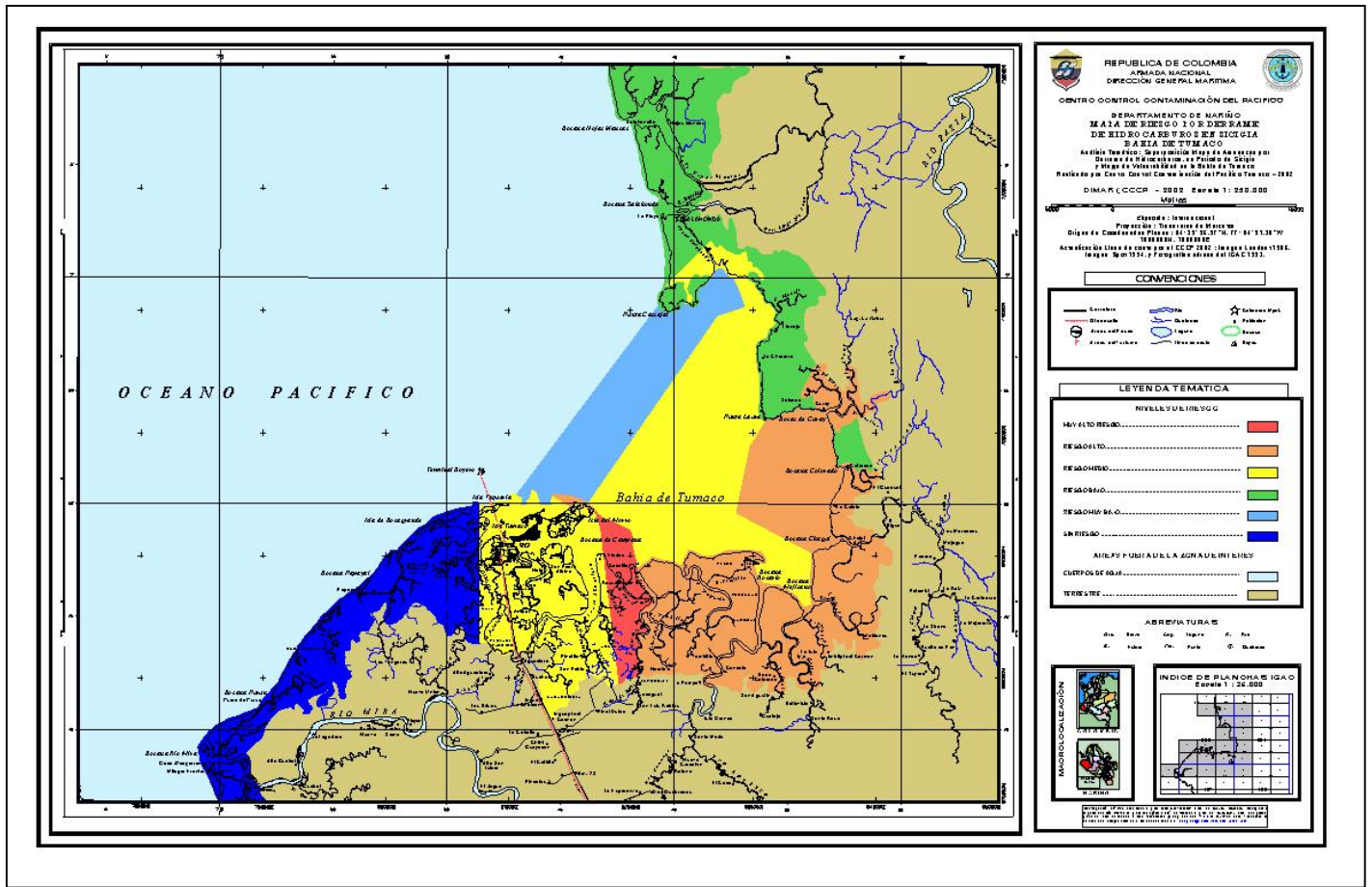


Figura 8. Mapa de Riesgos en Sicigia ante un Derrame de Hidrocarburos desde la Estación de Ecopetrol. En color rojo oscuro, el área de muy alto riesgo; en naranja, la zona de alto riesgo; en amarillo, la zona de riesgo medio; en verde, la zona de riesgo bajo; en azul claro, la zona de riesgo muy bajo, y en azul, oscuro la zona sin riesgo.

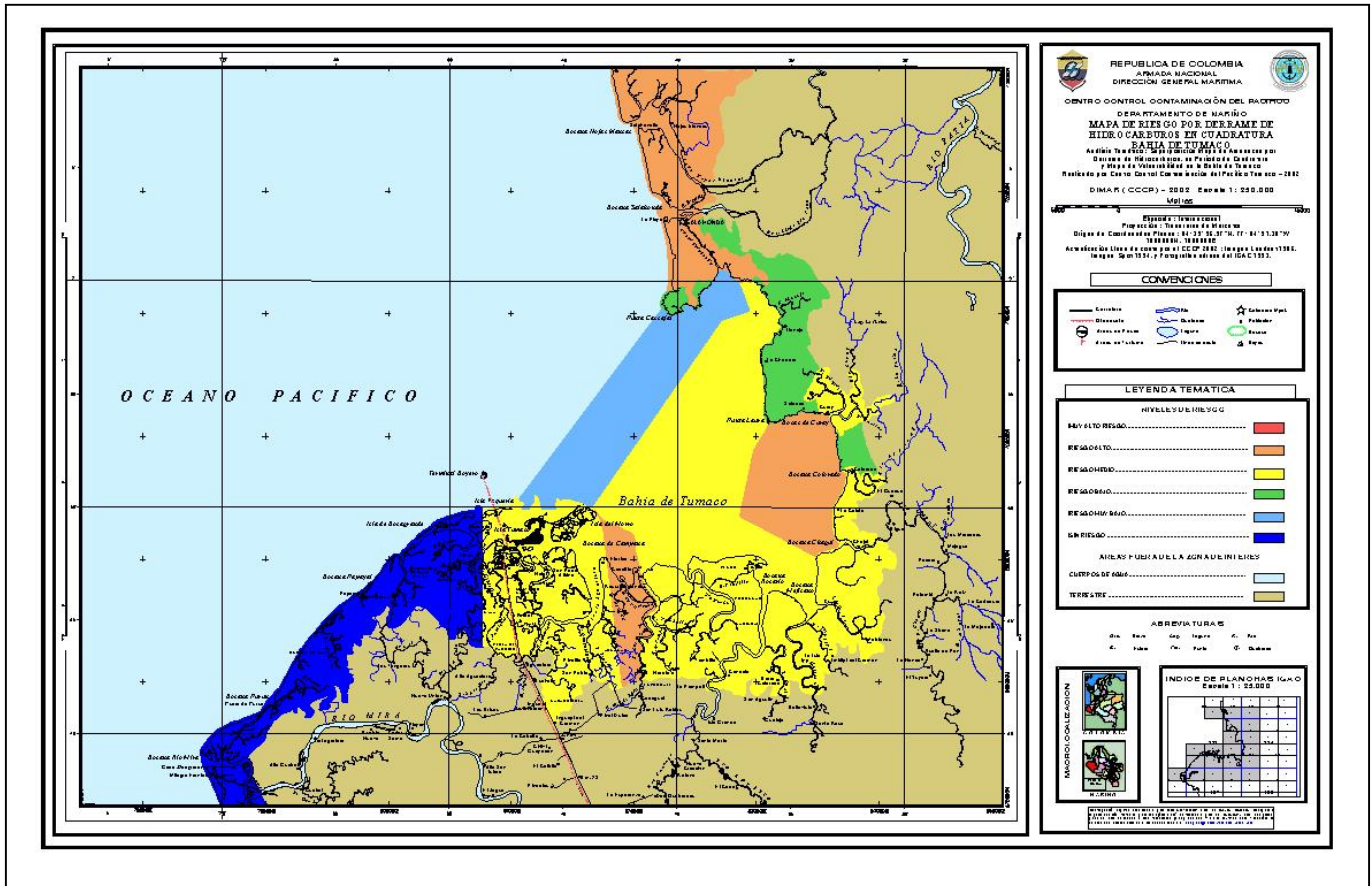


Figura 9. Mapa de Riesgos en Cuadratura ante un Derrame de Hidrocarburos desde la Estación de Ecopetrol. En color naranja, las zonas de riesgo alto; en amarillo, las zonas de riesgo medio; en verde, las zonas de riesgo bajo; en azul claro, las zonas de riesgo muy bajo, y en azul oscuro, la zona sin riesgo.



Figura 10. Pequeños derrames de combustible en la bahía de Tumaco.

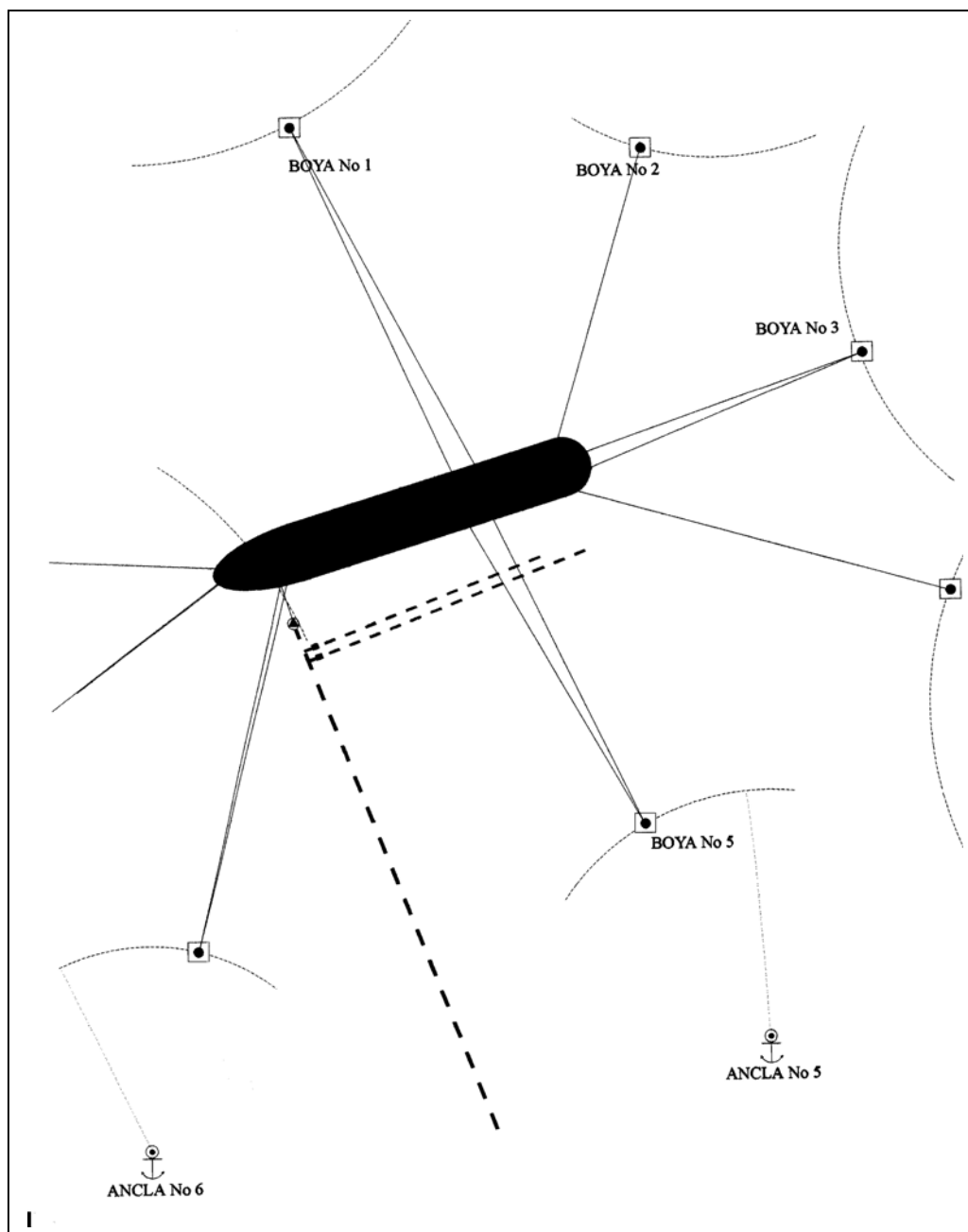


Figura 11. Esquema básico para la operación de carga de hidrocarburos a un buque en el terminal de Ecopetrol de la bahía de Tumaco.



Figura 12. Derrame continental ocurrido en el río Rosario durante el año 2000.

Tabla 2. Matriz para la determinación de escala de riesgos.

Amenaza \ Vulnerabilidad	Alta amenaza	Media amenaza	Baja amenaza	Sin amenaza
Muy alta vulnerabilidad				
Alta vulnerabilidad				
Media alta vulnerabilidad				
Media baja vulnerabilidad				
Baja vulnerabilidad				
Muy baja vulnerabilidad				