

## 4. METODOLOGÍA

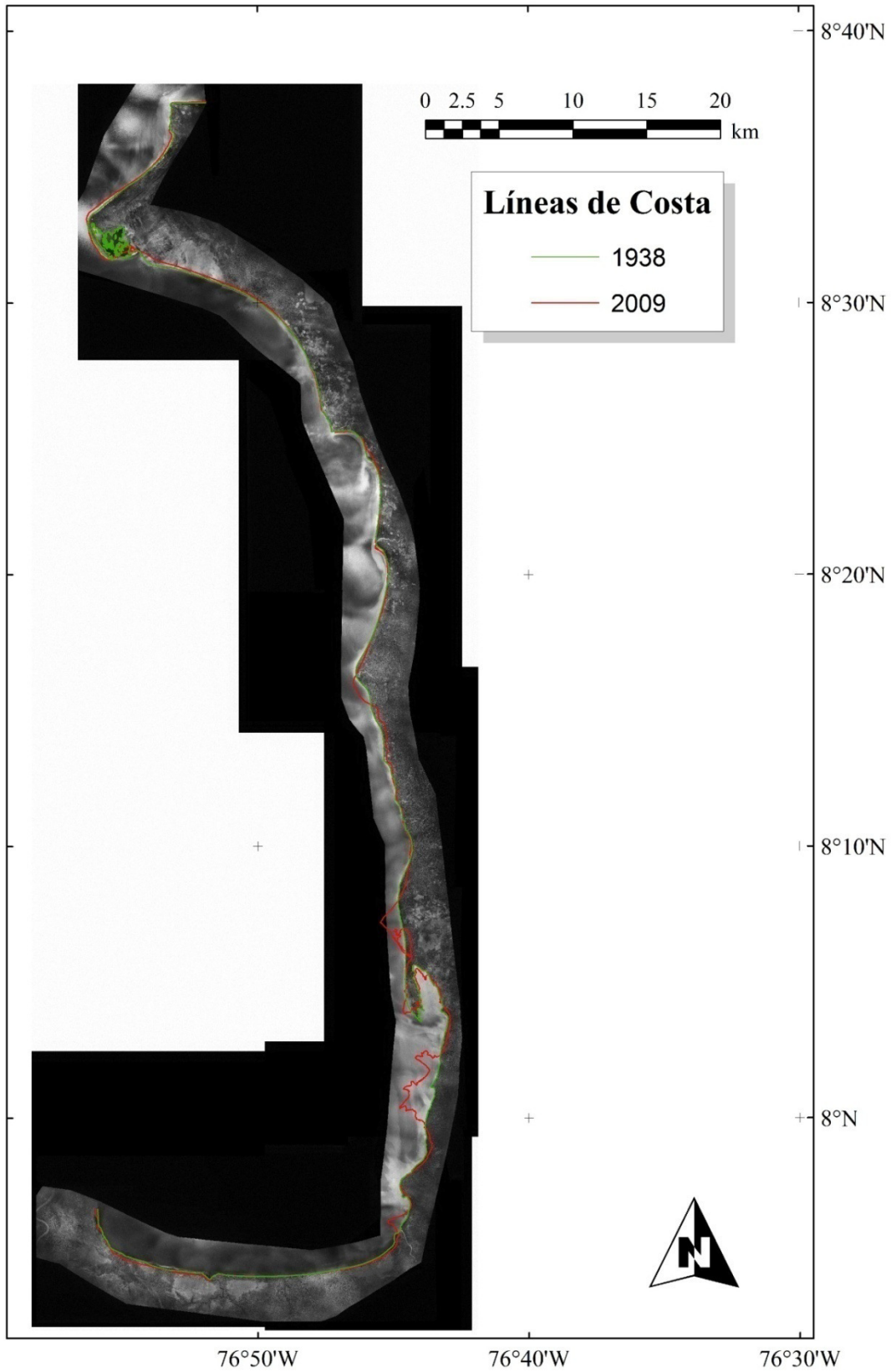
### 4.1. *Inventario del cambio de la posición de la línea de costa de la parte oriental del Golfo de Urabá entre 1938 y 2009*

Para calcular el cambio en la posición de la línea de costa oriental del Golfo de Urabá entre 1938 y 2009 se delinearón las fronteras de vegetación estable, límite de vegetación dunar y topes de acantilados entre Bahía Colombia y Punta Caribaná, con base en mosaicos de fotografías aéreas georreferenciadas y ortorrectificadas (**Figura 4.1** y **Figura 4.2**). Estos mosaicos pueden considerarse como la información histórica comparable entre sí más precisa a la fecha, los cuales cuentan, entre otras características, con píxeles que cubren el área de un cuadrado de lado 0.50 m, año 1938, y 0.30 m, año 2009 (Prüssmann, 2012; Correa *et al.*, en prensa).

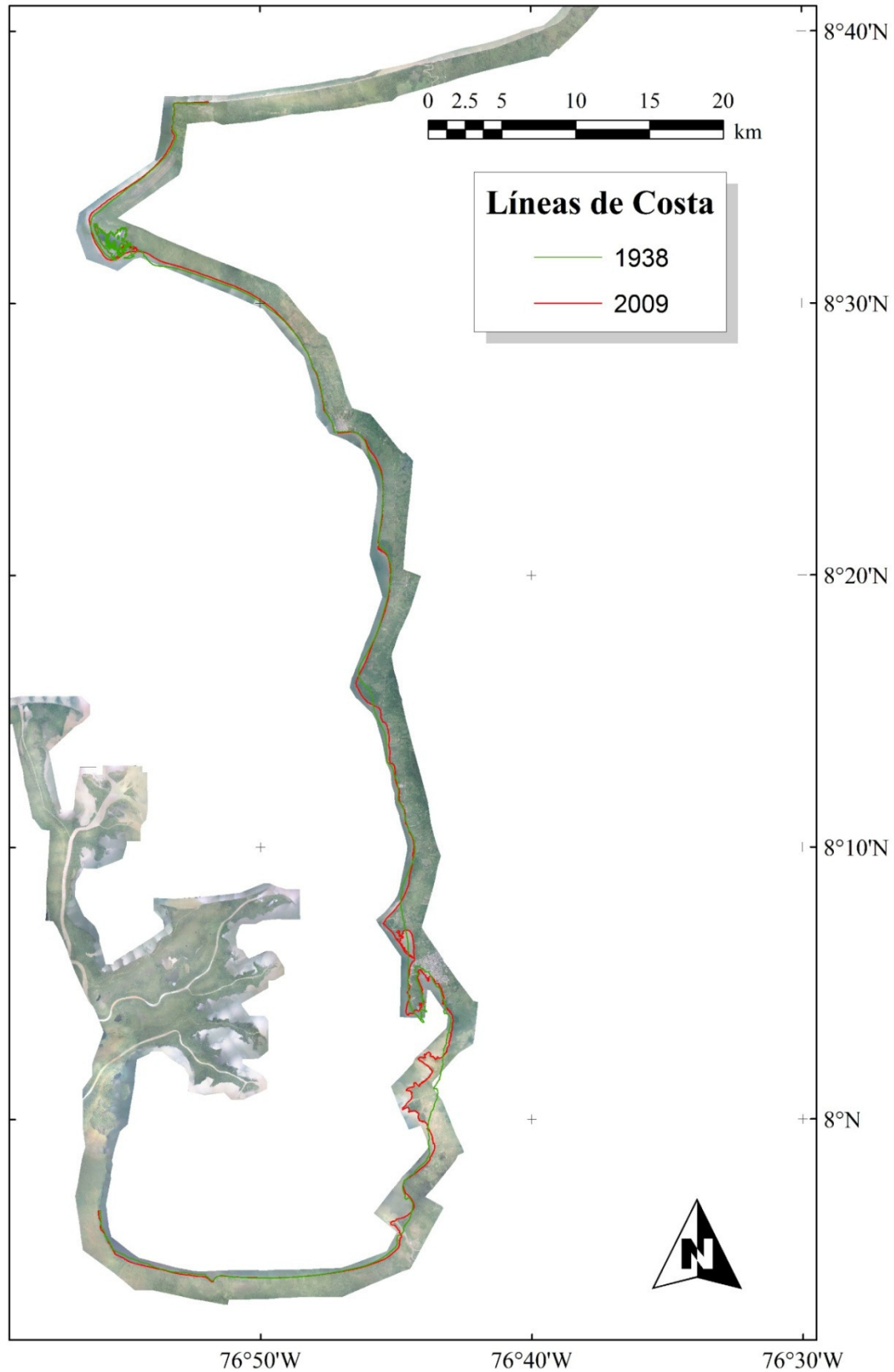
#### 4.1.1. Cartografía de la línea de costa y posiciones futuras

El delineamiento de las líneas de costa se realizó creando entidades tipo polilínea en el SIG ArcMap®. La utilización de este tipo de entidades vectoriales permitió el uso de la aplicación *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) para calcular diferentes parámetros como representación del cambio en la línea de costa (Thieler *et al.*, 2009). Esto último es posible si se utilizan como proyección un sistema cartesiano, *v.gr.* coordenadas XY en metros, que en este caso corresponde a la proyección Magna Colombia Oeste (**Tabla 4.1**).

En sentido general, DSAS utiliza transectos perpendiculares a una línea base para calcular las distancias entre dos o más líneas de diferentes años, a partir de parámetros de cálculo definidos por el usuario (longitud de transectos, distancia entre ellos, estadístico a calcular, etc.) En este caso, se utilizaron transectos cada 50 m, con 2 km de longitud en la mayoría de los casos, con la opción de cálculo Tasa de Punto Final (*End Point Rate*, EPR), definida como la relación entre la distancia entre las intersecciones de las líneas de costa a lo largo de un transecto y la diferencia entre los años respectivos (Himmelstoss, 2009). Los archivos tipo texto generados por DSAS fueron procesados utilizando el software Matlab®, con el fin de calcular los estadísticos de tendencia central (promedios y desviaciones estándar) de acuerdo con los valores positivos o negativos (avance o retroceso) en 49 zonas a lo largo de la franja litoral de estudio.



**Figura 4.1.** Mosaico de aerofotografías de 1938, georreferenciadas y ortorectificadas, del costado oriental del Golfo de Urabá. Imagen creada por Aeroestudios S.A. (<http://www.aeroestudios.com>).

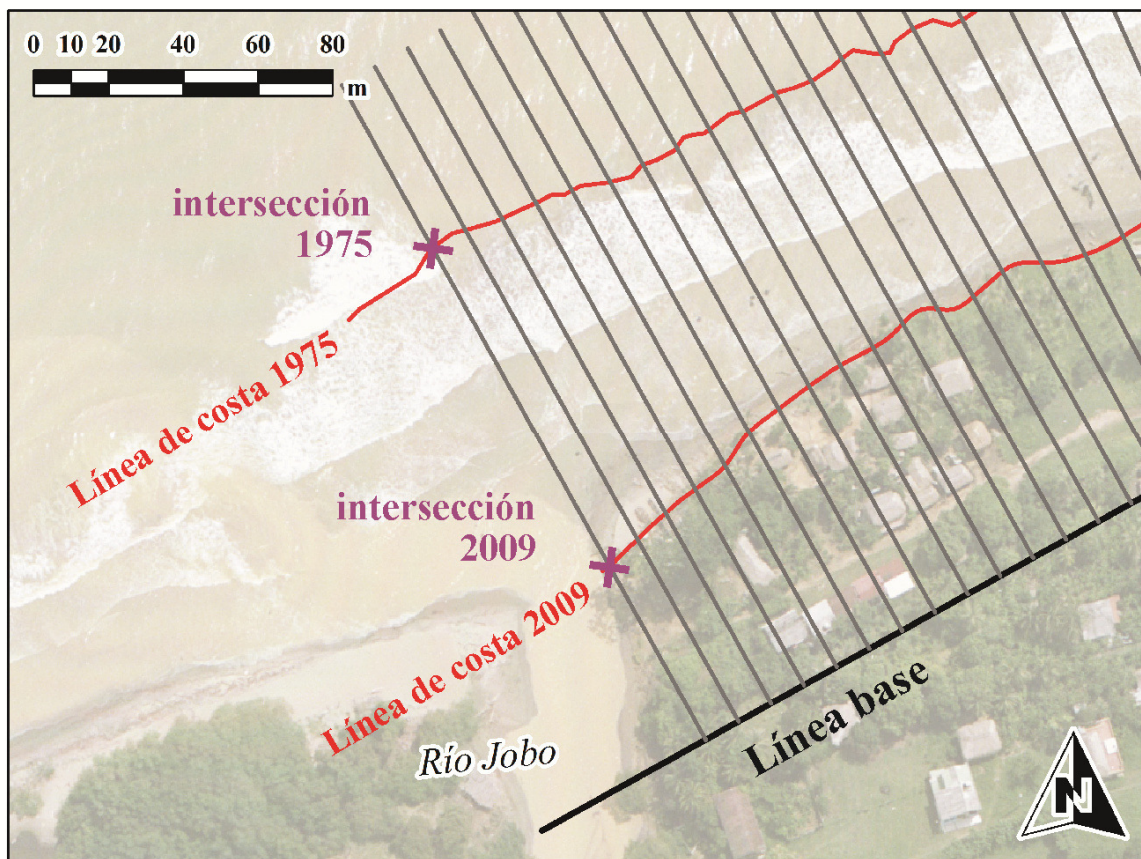


**Figura 4.2.** Mosaico de aerofotografías de 2009, georreferenciadas y ortorectificadas, del costado oriental del Golfo de Urabá. Imagen creada por Aeroestudios S.A. (<http://www.aeroestudios.com>).

**Tabla 4.1.** Características de la proyección de los mosaicos ortorectificados utilizados en la cartografía de las líneas de costa de 1938 y 2009.

Proyección Magna Colombia Oeste	
Tipo	TransverseMercator
Falso Oeste	1'000,000
Falso Norte	1'000,000
Meridiano Central	-77.077508°
Latitud del origen	4.5962°

Específicamente, los resultados procedentes de DSAS son: (1) información espacial de los transectos a partir de los cuales se calcularon las tasas de retroceso, incluyendo las coordenadas de intersección con las líneas de costa, y las distancias entre ellas y una línea base; y (2) las velocidades de retroceso calculadas con la información de cada transecto, como la relación entre la distancia entre las líneas de costa y la ventana temporal entre ambas (**Figura 4.3**).



**Figura 4.3.** Ejemplo de visualización de los elementos del cálculo del valor EPR en DSAS. La imagen corresponde a los parámetros de cálculo del sur del sector de Arboletes, en la desembocadura del río Jobo, con el fondo del mosaico de 2009. Aquí se observan las intersecciones de uno de los transectos con las líneas de costa de 1975 y 2009. La distancia de retroceso sería la distancia entre las intersecciones a lo largo del transecto dividida por el número de años transcurridos (en este caso desde 1975 hasta 2009,  $2009 - 1975 = 34$  años).

## ***4.2. Predicción de las magnitudes de retroceso en algunos sectores de acantilados blandos ante escenarios de ascenso del nivel del mar.***

Siguiendo las recomendaciones de Walkden y Hall (2005) y Brooks y Spencer (2012), se predijeron las magnitudes de retroceso de acantilados blandos en cuatro sectores del litoral antioqueño. Estas predicciones se basan en dos clases de información: (1) las condiciones presentes de erosión, *i.e.* velocidades históricas de retroceso de línea de costa; y (2) las tasas esperadas de ascenso del NMM para escenarios futuros, sin tener en cuenta cambios en los procesos presentes en el litoral como el clima de olas o el régimen mareal. En resumen, se obtuvieron las velocidades de retroceso para 50 años después de la última cartografía de la línea de costa, producto de la aceleración de la velocidad del ascenso del NMM.

### ***4.2.1. Modelos de predicción de retroceso en acantilados blandos***

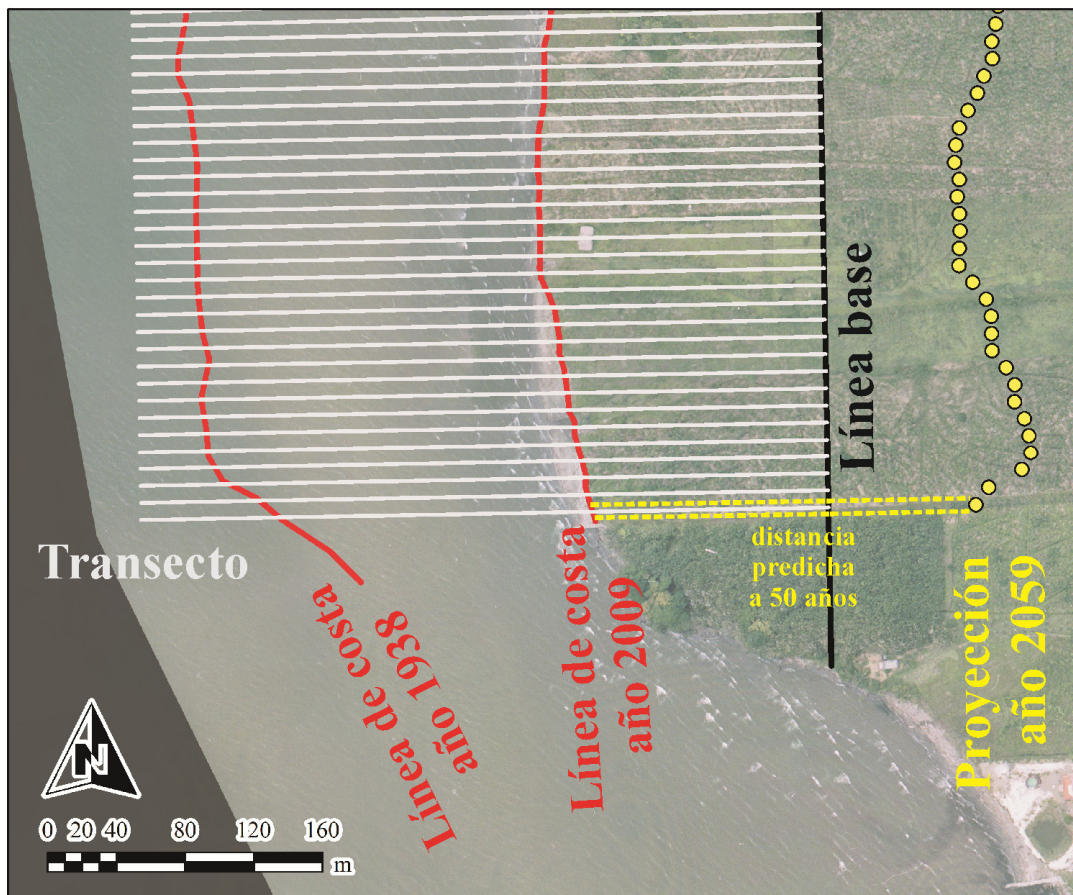
El retroceso futuro se calculó a partir de dos formulaciones matemáticas, propuestas por Sunamura (1992), y Walkden y Dickson (2008), **Tabla 4.2**, y revisadas por Brooks y Spencer (2012). Utilizando la información de los parámetros de DSAS, se calculó la distancia futura a lo largo de cada transecto, a partir de la tasa futura calculada con las ecuaciones y la ventana temporal considerada desde la última cartografía (50 años). De este modo, se ubicaron las coordenadas XY futuras en la dirección de cada transecto, y luego se unieron para representar la línea de costa futura. Los parámetros involucrados en esta operación se representan en la **Figura 4.4**. En síntesis, como datos de entrada se requieren las tasas erosivas históricas ( $R_1$ , en este caso EPR), la distancia de retroceso histórica ( $D_1$ ), el clima de olas registrado (para calcular  $d_c$  y  $W_p$  para utilizar la ecuación de Sunamura), y las tasas de ascenso del nivel del mar histórica y esperada ( $S_1$  y  $S_2$  respectivamente). Como dato de salida está el valor  $R_2$ , que corresponde a la tasa de erosión esperada considerando un escenario específico de ascenso del NMM.

### ***4.2.2. Valor de ascenso del NMM ( $S_1$ ) para la franja litoral de Antioquia***

El valor  $S_1$  en la franja litoral de Antioquia corresponde a la pendiente de la regresión linear de los registros de nivel del mar de altimetría por satélite de TOPEX/Poseidon, Jason-1 y Jason-2 (nivel de confianza estadística del 95%, **Figura 4.5**), tomado para el punto geográfico 9°N – 77°W, con información desde 1993 hasta 2012 (Nerem *et al.*, 2010). Dada la naturaleza de estos datos, este valor puede considerarse como el ascenso del NMM para este punto. Por otra parte, el parámetro  $S_2$  fue obtenido a partir de valores incluidos en los rangos de predicciones de ascenso

del NMM propuestas para 2100 (Meehl *et al.*, 2007, Pfeffer *et al.*, 2008, Vermeer y Rahmstorf, 2009 y Jevrejeva *et al.*, 2010) resumidos en la **Tabla 4.3** y la **Figura 4.6**, la cual incluye además los registros históricos de mareógrafos alrededor del mundo (Church y White, 2011).

Como caso particular, la ecuación de Sunamura requiere, además de los valores históricos y futuros ya mencionados, los datos del clima de olas de la franja litoral en cuestión. Para ello se utilizaron los registros del modelo de oleaje del Mar Caribe (Posada *et al.*, en prensa) cuyos resultados corresponden al mes de diciembre de 2008 y el año completo de 2009, y fueron utilizados como estadísticos representativos de las condiciones generales del clima de olas de la zona de estudio. Con estos valores se calculó el parámetro llamado profundidad de cierre ( $d_c$ , *depth of closure*) para cada sitio (**Tabla 4.4**) utilizando las ecuaciones propuestas por Nicholls *et al.* (1998), y Dean y Dalrymple (2004).



**Figura 4.4.** Parámetros utilizados para la proyección de las posiciones futuras de la línea de costa. Nótese las líneas de costa históricas en rojo, los transectos en gris, línea base en negro y la proyección en amarillo. Imagen tomada de las proyecciones para el sur del sector de El Tié, municipio de Turbo.

**Tabla 4.2.** Resumen de las ecuaciones utilizadas en el cálculo del retroceso futuro en sectores de acantilados de rocas blandas de Antioquia y Córdoba.

Parámetro a calcular (Fuente)	Ecuación <sup>(a)</sup>
Tasa de retroceso de línea de costa en plataformas litorales (Sunamura, 1992)	$R_2 = R_1 + \frac{(S_2 - S_1)(D_1 + W_p)}{d_c}$
Tasa de retroceso de línea de costa de acantilados blandos (Walkden y Dickson, 2008)	$R_2 = R_1 \sqrt{\frac{S_2}{S_1}}$
Profundidad de cierre para Sunamura (Nicholls <i>et al.</i> , 1998)	$d_c = 2.28 H_e - 68.5 \left( \frac{H_e^2}{g T_e^2} \right)$
Altura efectiva de ola para calcular profundidad de cierre <sup>(b)</sup> (Dean y Dalrymple, 2004)	$H_e = \bar{H}_s + 5.66 \sigma_H$

<sup>(a)</sup> Ver texto para la explicación de cada uno de los parámetros de las ecuaciones

<sup>(b)</sup> La altura efectiva de ola corresponde a la altura que es excedida únicamente 12 horas en un año

**Tabla 4.3.** Escenarios de ascenso del NMM para 2100 utilizados en los cálculos de la posición futura de la línea de costa.

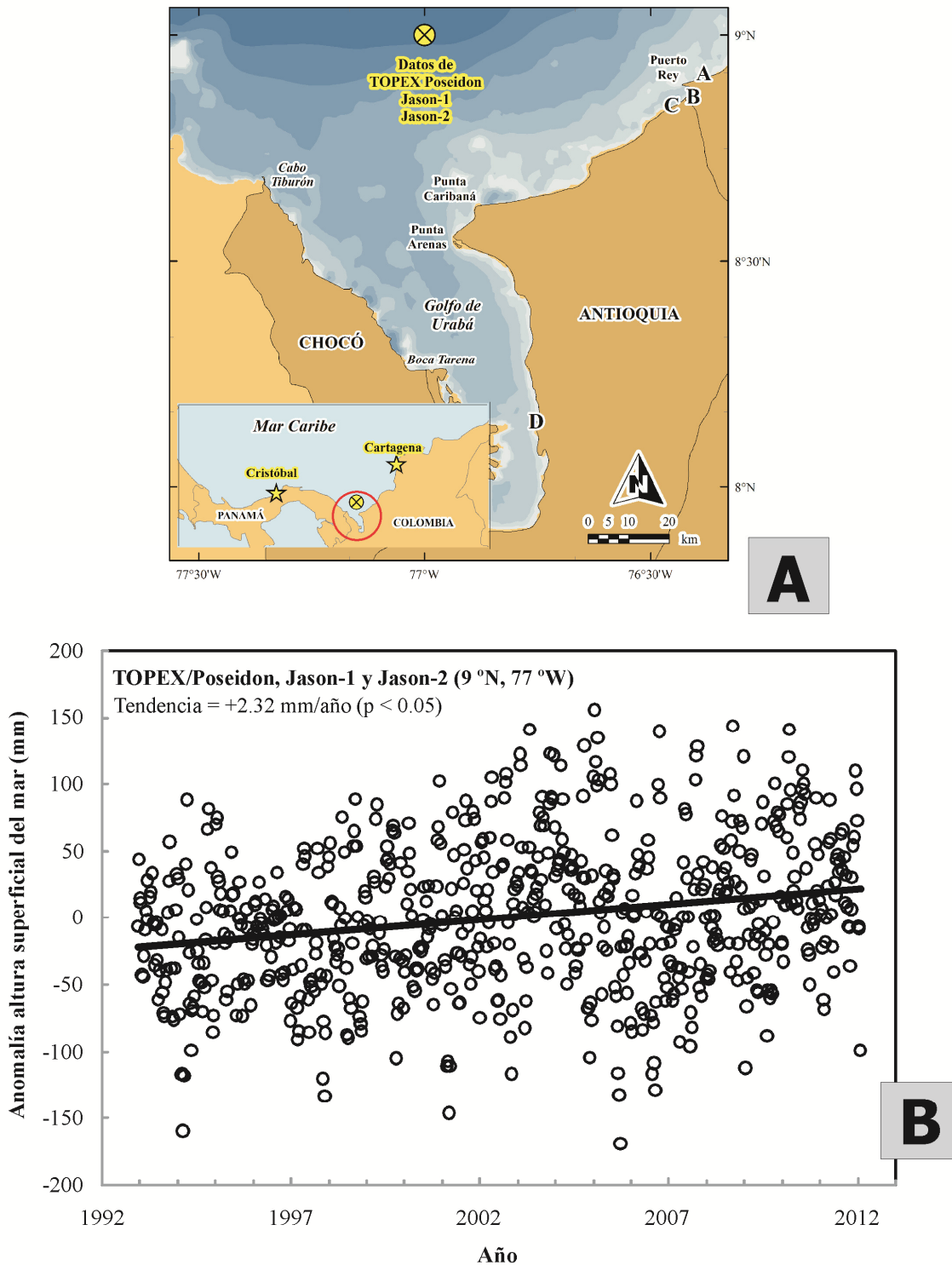
Escenario	Tasa ascenso NMM (mm/año)	Ascenso del NMM total a 2100 (cm)
1	2.32 <sup>(a)</sup>	20.4
2	7.0	61.6
3	10.0	88.0
4	22.0	193.4

<sup>(a)</sup> Esta velocidad de ascenso del NMM corresponde a la actual, registrada con altimetría por satélite (Nerem *et al.*, 2010)

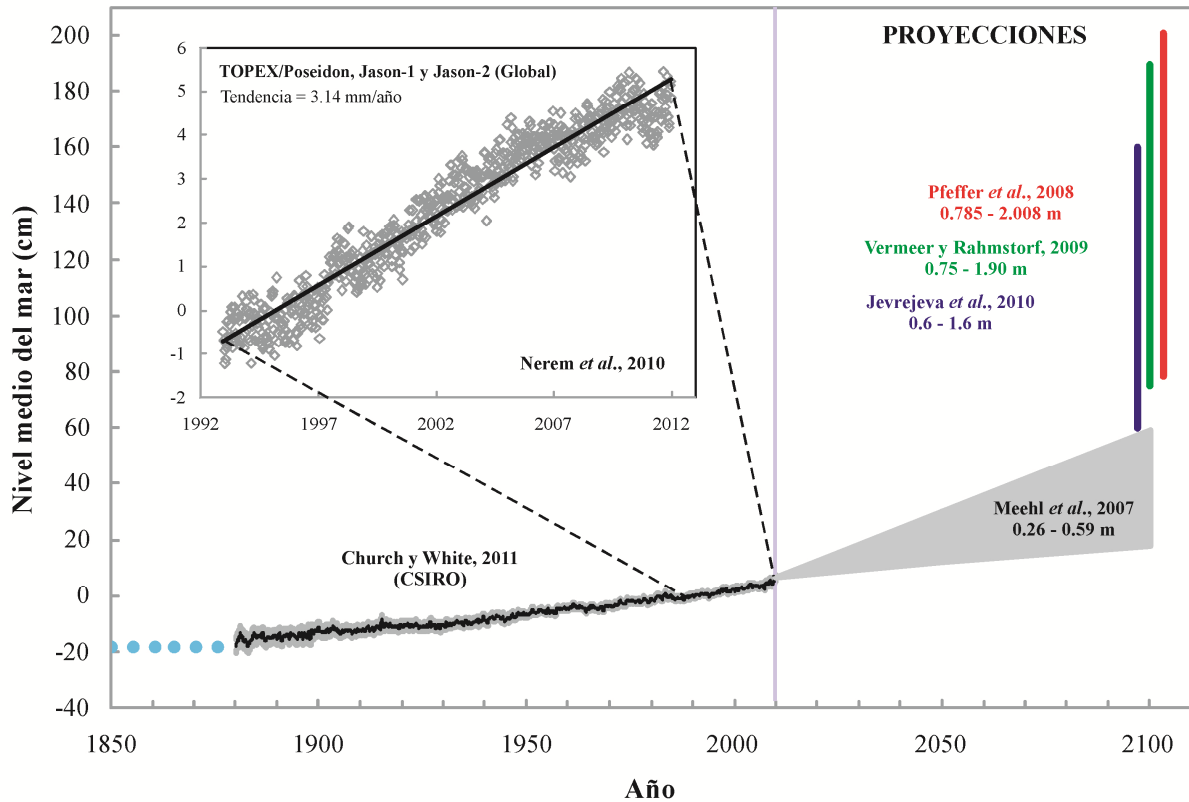
**Tabla 4.4.** Resumen de los resultados tomados del modelo de oleaje para el sur del Mar Caribe de Colombia (franja litoral de Antioquia y Golfo de Urabá).

Sitio	$\bar{H}_s^{(a)}$ (m)	$\sigma_{Hs}$ (m)	$H_e$ (m)	$T_p$ (s)	$\sigma_{Tp}$ (s)	$T_e$ (s)	$d_c$ (m)
Arboletes	0.58	0.25	1.97	3.28	0.76	7.55	4.02
Mínuto de Dios	0.27	0.10	0.81	2.81	0.84	7.51	1.76
Los Córdoba	0.35	0.26	1.81	2.75	0.87	7.64	3.73
Tié	0.49	0.28	2.04	2.94	0.59	6.22	3.90

<sup>(a)</sup> Los resultados corresponden a: ( $\bar{H}_s$ ) altura significativa de ola media; ( $\sigma_{Hs}$ ) desviación estándar de la altura significativa de ola media; ( $H_e$ ) altura efectiva de ola; ( $T_p$ ) periodo pico de ola; ( $\sigma_{Tp}$ ) desviación estándar del periodo pico de ola; ( $T_e$ ) periodo efectivo de ola; ( $d_c$ ) profundidad de cierre.



**Figura 4.5.** Registros de nivel del mar de altimetría por satélite. (A) Ubicación del punto 9°N, 77°W de los registros de TOPEX/Poseidon, Jason-1 y Jason-2 (Nerem *et al.*, 2010), y los mareógrafos más cercanos, Cristóbal y Cartagena. (B) La pendiente de la línea recta ( $S_2 = 2.32 \text{ mm/año}$ ) indica la tasa de aumento en los datos con una confiabilidad estadística del 95% (datos tomados de <http://sealevel.colorado.edu>).



**Figura 4.6.** Registros de nivel medio del mar históricos desde finales del s. XIX de mareógrafos (Church y White, 2011) y altimetría por satélite hasta 2012 (Nerem *et al.*, 2010). Se toma como nivel medio del mar cero en 1990. De 2012 a 2100 se muestran las proyecciones de ascenso del NMM de: (triángulo gris) Meehl *et al.*, 2007; (violeta) Jevrejeva *et al.*, 2010; (verde) Vermeer y Rahmstorf, 2009; y (rojo) Pfeffer *et al.*, 2008. Dentro de este rango de valores se encuentran los escenarios de ascenso del NMM utilizados en este estudio.

### 4.3. Resumen Metodología

En primer lugar, se calculó la Tasa de Punto Final (EPR) para obtener las distancias de migración de la línea de costa entre Punta Caribaná y Bahía Colombia, margen oriental del Golfo de Urabá. Asimismo, se calcularon las áreas de diferencia entre ambas líneas de costa, como áreas ganadas o pérdidas de terrenos asociadas con el retroceso o avance de la línea de costa.

Luego, a partir de las magnitudes de retroceso en sectores de acantilados blandos (Los Córdoba, Minuto de Dios, Arboletes y El Tié) y utilizando ecuaciones de predicción geomorfológica aceptadas y usadas alrededor del mundo, se calcularon las tasas futuras y correspondientes posiciones de la línea de costa considerando varios escenarios de ascenso del NMM para 50 años luego de la última cartografía disponible (2054 para Los Córdoba y 2059 para Minuto de Dios, Arboletes y El Tié).

