

5. RESULTADOS

5.1. Migración de la línea de costa entre Bahía Colombia y Punta Caribaná de 1938 a 2009

El cambio de la posición de la línea de costa entre Bahía Colombia y Punta Caribaná de 1938 a 2009 está representado por las tasas de migración en metros por año que se muestran en la **Figura 5.1** y la **Figura 5.2**. Estas tasas corresponden al promedio de cada zona de acreción (valores positivos) y erosión (negativos), que están a su vez vinculadas con las áreas de terrenos ganados/perdidos (áreas entre las líneas de costa de 1938 y 2009) en kilómetros cuadrados (**Figura 5.3** y **Figura 5.4**). Para facilitar la representación espacial de estos valores, la franja litoral de estudio se dividió en cuatro sectores:

1. Bahía Colombia – desembocadura del río Guadualito
2. Punta Las Vacas – desembocadura río Caimán Nuevo
3. Desembocadura del río Caimán Nuevo – Necoclí
4. Necoclí – Punta Caribaná

En términos generales, el balance de áreas ganadas/perdidas entre 1938 y 2009 evidencia ganancia a largo plazo: +12.8 km² de acreción contra -9.7 km² de erosión. La ganancia de terrenos se ha dado casi exclusivamente en las desembocaduras de algunos ríos principales de la zona (*v.gr.* León, Guadualito, Currulao, Turbo, Caimán Nuevo), salvo algunos sectores como las playas de El Venado (Punta Caribaná) y El Totumo (sur de Necoclí), y los bosques de manglar entre Punta Arenas Norte y Punta Arenas Sur. Por su parte, la pérdida de terrenos más importante se ha identificado en El Tié, en inmediaciones de la desembocadura del río Turbo y en Bocas de Urabalito. A continuación se resumen las magnitudes de migración por sector.

5.1.1. Sector uno: Bahía Colombia – desembocadura ríos Guadualito

(*cf.* **Figura 5.1** y **Figura 5.3**, izquierda)

En este sector sobresalen los valores positivos, con ganancia de terrenos en las desembocaduras de los ríos principales, y terrenos perdidos prácticamente a lo largo de toda la línea de costa del sector. Los valores máximos son los siguientes:

- a. Desembocaduras de los ríos Currulao, Guadualito y León (tasas de +16.10, +16.40 y +6.55 m/año; áreas ganadas cercanas a +5.74 y +0.78 km²).
- b. -1.85 m/año en Bahía Colombia (-0.97 km²), -2.48 m/año en la Bahía de Turbo (-0.62 km²) y -2.62 m/año (-0.72 km²) inmediatamente al sur de la desembocadura del río Currulao.

5.1.2. Sector dos: Punta Las Vacas – desembocadura del río Caimán Nuevo

(cf. **Figura 5.1** y **Figura 5.3**, derecha)

Las magnitudes de migración muestran compensaciones entre los terrenos ganados y perdidos, sin una tendencia clara. Sobresalen:

- a. Ganancia de terrenos en las desembocaduras de los ríos Turbo (+4.88 a +15.20 m/año; +2.04 km²) y Caimán Nuevo (+6.60 m/año, +0.97 km²), interior de la Bahía de Turbo (+2.79 m/año, +0.46 km²) y en Punta Las Vacas (+3.49 m/año, 0.26 km²).
- b. Pérdida de terrenos localizada en Punta Las Vacas (-6.67 m/año, -0.35 km²), que “equilibra” a los terrenos ganados allí mismo, inmediaciones del delta del río Turbo (-1.45 a -2.58 m/año, -0.53 a -0.98 km²) y en El Tié (-3.14 m/año, -1.16 km²).

En el caso de El Tié (tasa de retroceso promedio de -3.14 m/año), al sur de la desembocadura del río Caimán Nuevo, se resalta la formación de escarpes conformados por sedimentos poco consolidadas con presencia de vegetación en el tope (**Figura 5.5**). Más al sur, en la localidad de Punta de Piedra, los testimonios de habitantes vinculan la erosión acelerada de playas y acantilados, ca. 80 m en total entre octubre de 2006 y enero de 2007 (ca. -20 m/mes), con la construcción aguas arriba del rompeolas del estadero El Acuarium. Esta obra de defensa, que fue denunciada ante las autoridades competentes por algunos pobladores debido al posible deterioro ambiental que preveían, provocó la formación de la playa de este estadero al interrumpir la deriva litoral predominante hacia el sur (**Figura 5.6**).

5.1.3. Sector tres: Desembocadura río Caimán Nuevo – Necoclí

(cf. **Figura 5.2** y **Figura 5.4**, izquierda)

En esta zona se existen áreas pequeñas (menores a 0.5 km²) tanto de acreción como erosión. Sobresalen los siguientes valores:

- a. Ganancia en la desembocadura del río Caimán Viejo (+1.23 m/año, +0.20 km²).

- b. Ganancia al norte del estadero El Mirador (+0.41 km², +0.41 a 0.46 m/año), aunque la zona presente fluctuaciones estacionales en la amplitud de la playa con estabilidad en la posición de la línea de costa de vegetación (**Figura 5.7**).
- c. Pérdida en la desembocadura del río El Bobal (–1.81 m/año, –0.40 km²).
- d. Estabilidad en los sectores entre los ríos Caimán Viejo y El Bobal (–0.05 a +0.01 km²) y en las inmediaciones de Necoclí (+0.01 a +0.05 km², +0.12 a +0.42 m/año).

5.1.4. Sector cuatro: Necoclí – Punta Caribaná

(*cf.* **Figura 5.2** y **Figura 5.4**, derecha)

Esta franja muestra las dos tendencias (erosión y acreción) en tres ubicaciones:

- a. Erosión en el sector de Bocas de Urabalito (–0.10 a –3.48 m/año, –1.84 km²).
- b. Acreción en la zona aledaña a la Ciénaga de Rionegro, llamada también Laguna del Águila (+1.43 a +2.49 m/año, +0.31 km²). Según las comparaciones de las líneas de costa, los límites del bosque de manglar han avanzado entre 1938 y 2009.
- c. Acreción entre Punta Arenas Norte y Punta Caribaná (+0.61 y +1.63 m/año, +1.11 km²).

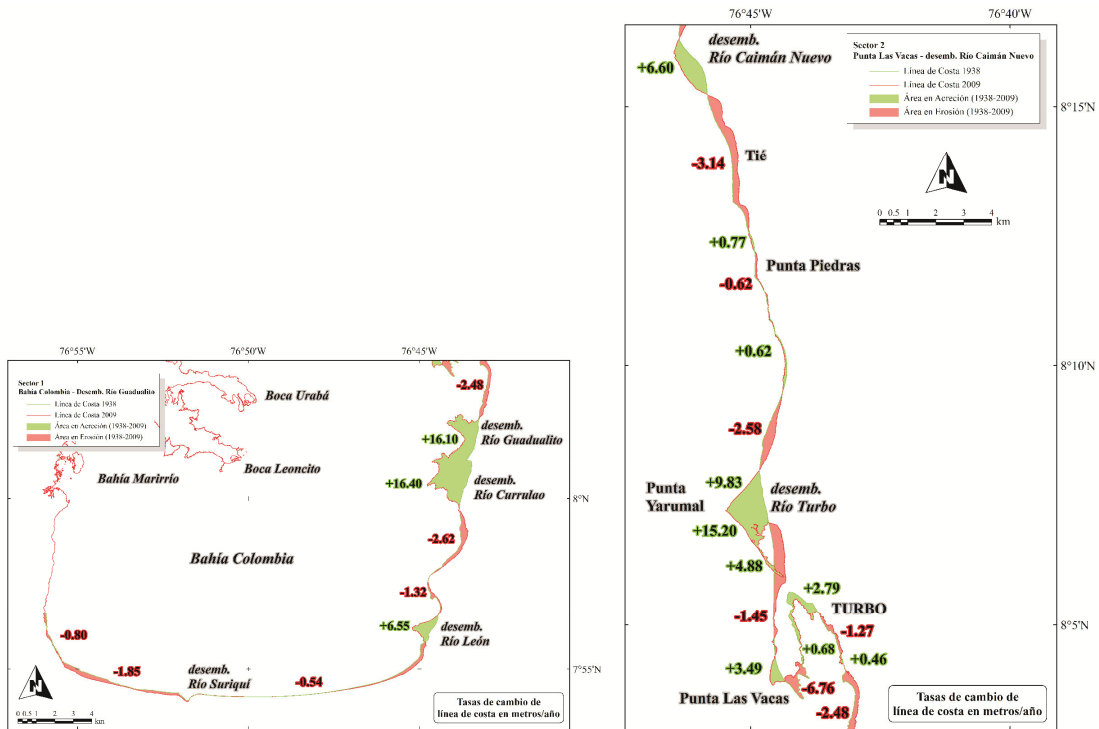


Figura 5.1. Tasas de migración de línea de costa entre 1938 y 2009 para los sectores uno (izquierda) y dos (derecha).

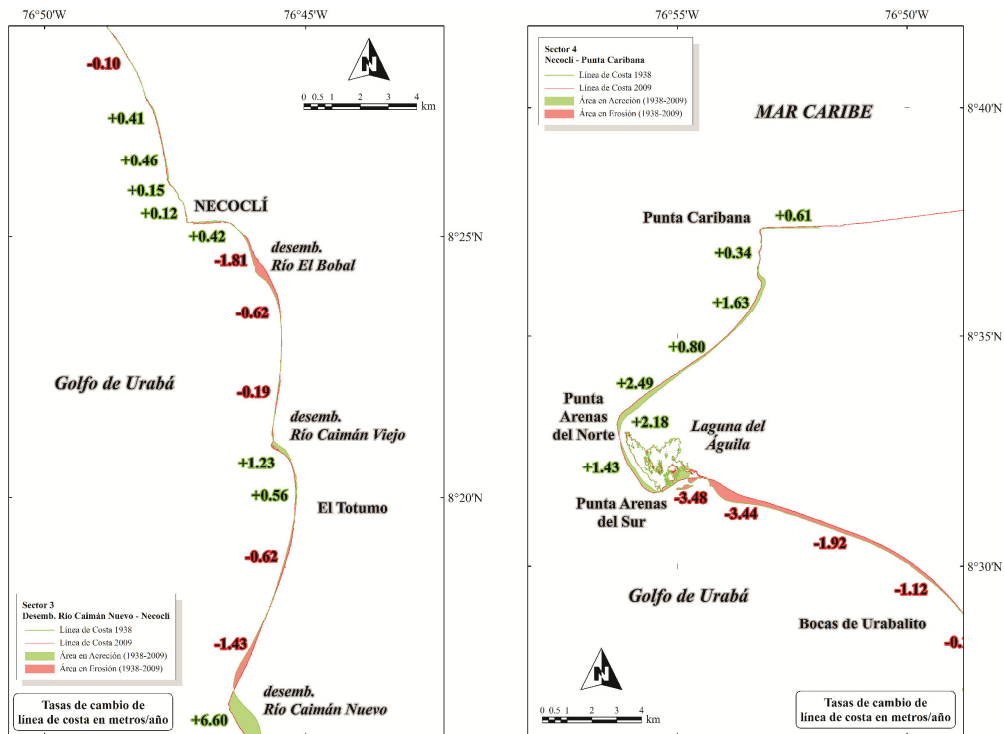


Figura 5.2. Tasas de migración de la línea de costa entre 1938 y 2009 (m/año) para los sectores tres (izquierda) y cuatro (derecha).

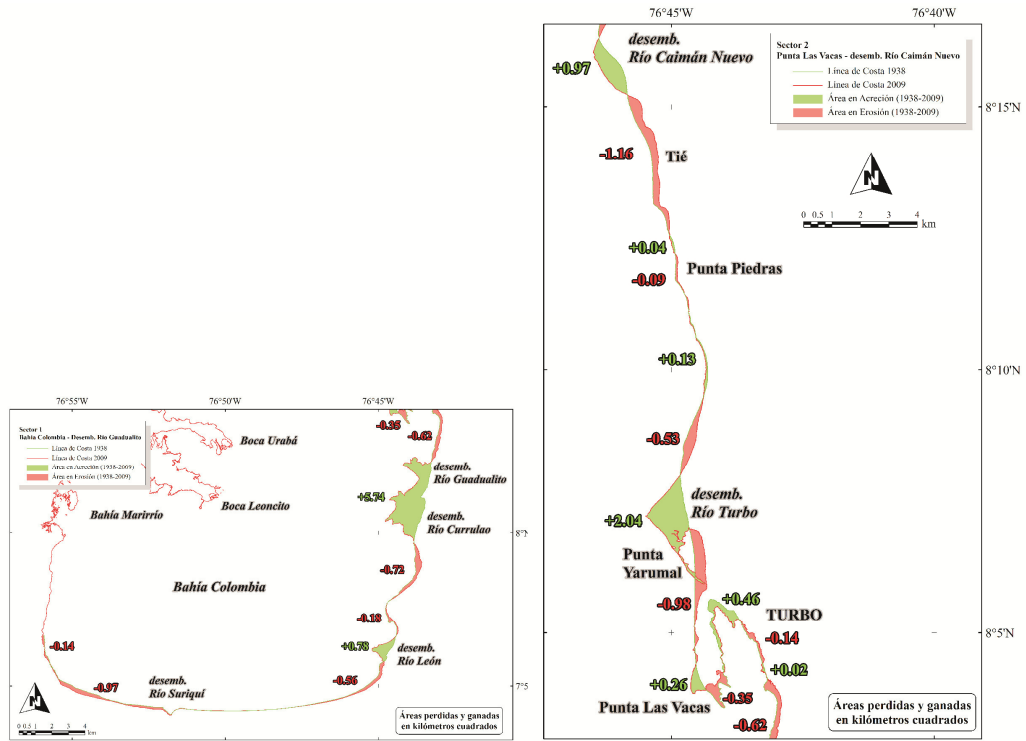


Figura 5.3. Mapas de áreas ganadas y perdidas entre 1938 y 2009 (en km²) para los sectores uno y dos.

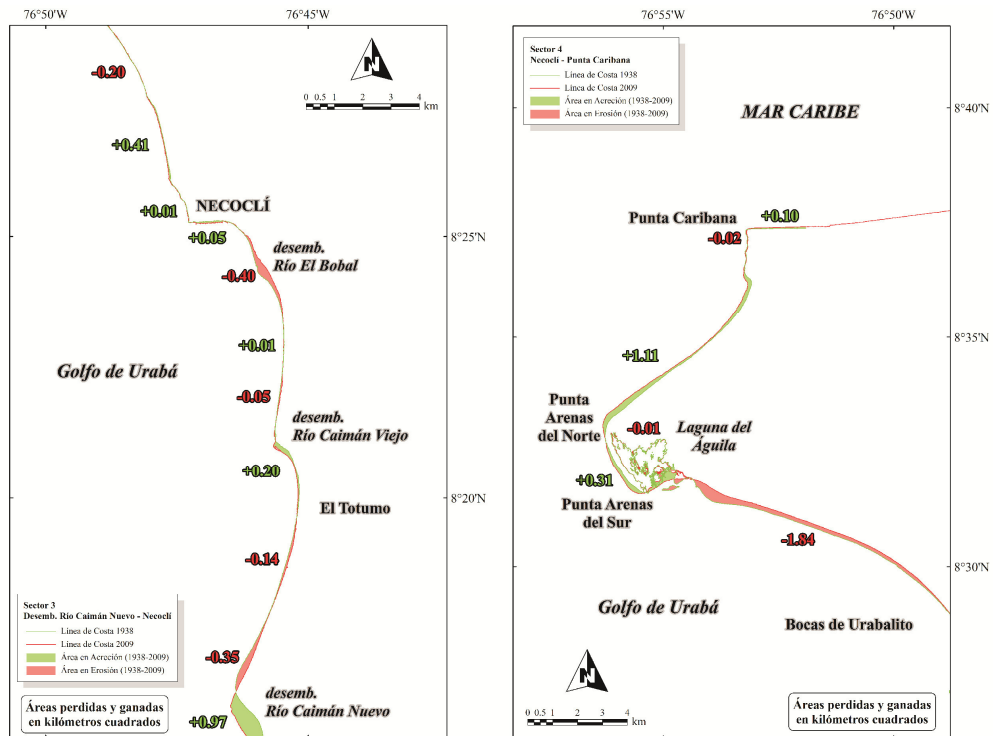


Figura 5.4. Mapas de áreas ganadas y pérdidas entre 1938 y 2009 en km², para los sectores tres y cuatro.

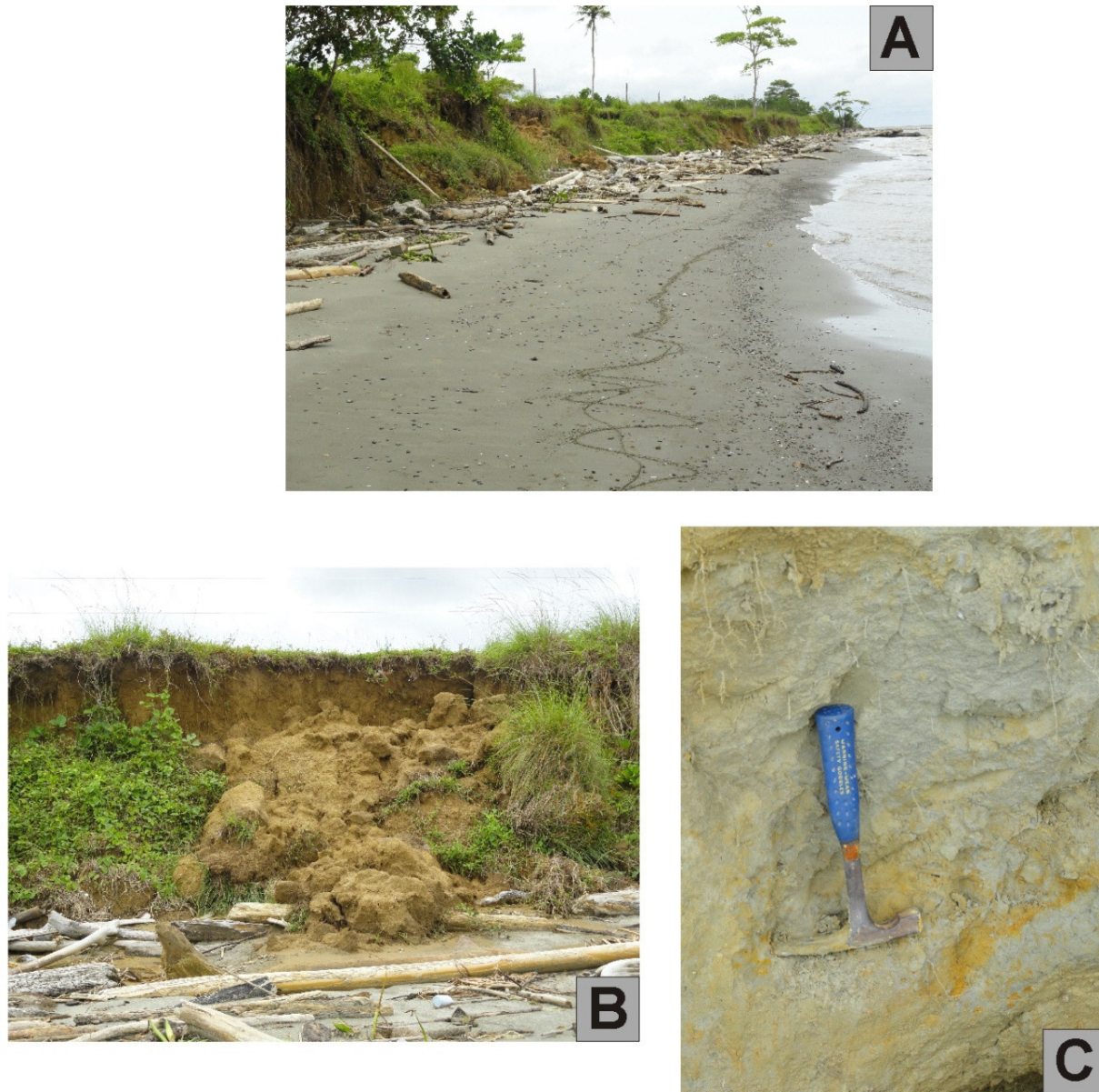


Figura 5.5. Escarpes ubicados en el corregimiento El Tié, municipio de Turbo. Fotografías tomadas el 19 de mayo de 2012 por Juan F. Paniagua. (A) Vista general de los escarpes vegetados formados en lodolitas poco consolidadas, con depósitos de playa y troncos en su frente; (B) caídas de rocas producidas por agentes subaéreos; (C) detalle de uno de los escarpes en materiales que exhiben baja resistencia mecánica.

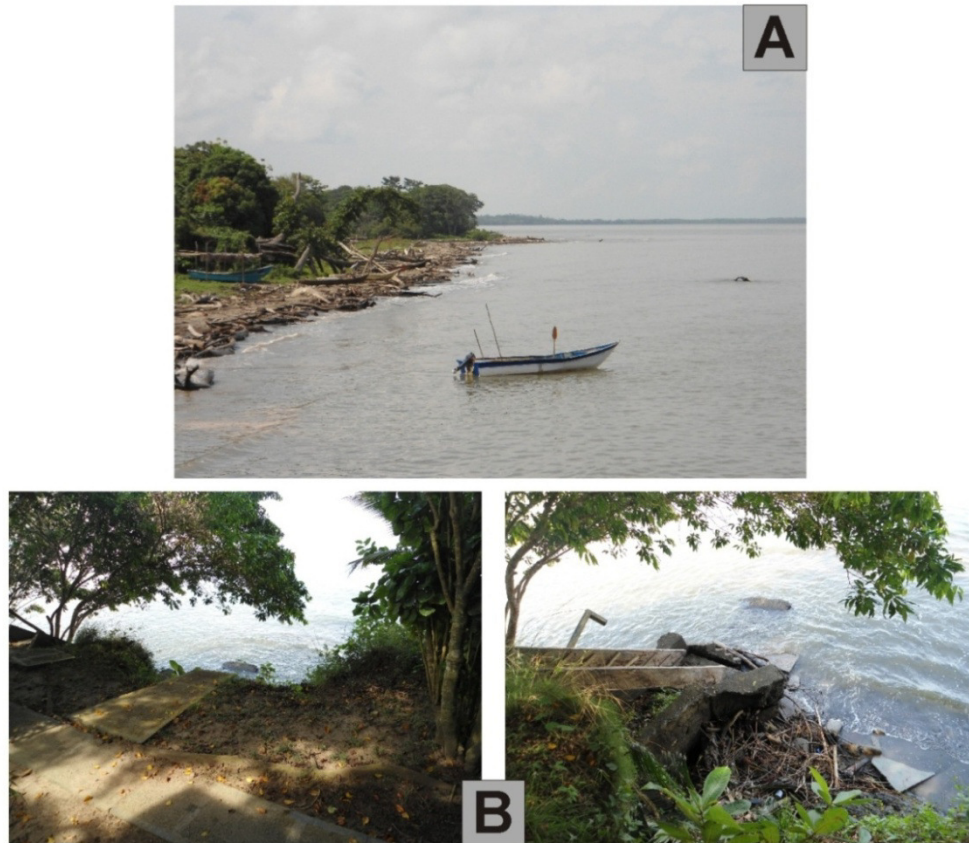


Figura 5.6. Evidencias de episodios erosivos recientes en el corregimiento Punta de Piedra, municipio de Turbo. (A) A la izquierda se observan los restos del árbol caucho que era la insignia del pueblo, el cual fue afectado durante los eventos de alta energía (mar de leva) ocurridos a finales del año 2006; a la derecha se ve el resto de una tubería en concreto como indicador de la posición de la línea de costa anterior; (B) restos de escaleras que llevaban a las antiguas playas que, según los habitantes, alcanzaban los 20 m en dirección perpendicular a la línea de costa. Fotografías tomadas el 20 de septiembre de 2012 por Juan F. Paniagua.



Figura 5.7. Cambios estacionales de la cantidad de arena de playa al norte del estero El Mirador, municipio de Necoclí, manteniendo prácticamente una línea de costa de vegetación estable constante. (A) Fotografía tomada en dirección sur desde una franja angosta de playa (menor a 1 m), desde donde puede verse el estero en la parte superior, noviembre 23 de 2011 por Juan F. Paniagua; (B) fotografía tomada en dirección sur desde la línea de acumulación de troncos, donde se muestra aproximadamente 10 m de depósitos de playa y el estero en el centro, septiembre 20 de 2012 por Juan F. Paniagua.

5.2. Predicción del retroceso de sectores críticos de acantilados blandos en Antioquia ante escenarios de ascenso del NMM

Las predicciones de las magnitudes de retroceso considerando escenarios de ascenso del NMM se realizaron para sitios críticos de acantilados de rocas blandas en Antioquia que cuentan con información histórica comparable. Como producto de esta actividad, se ubicaron geográficamente las posiciones posibles de la línea de costa a 50 años luego de la última cartografía de cada sector, teniendo en cuenta los siguientes aspectos prácticos:

- a. Los años de predicción son 2054 para Los Córdoba (departamento de Córdoba) y 2059 para Minuto de Dios, Arboletes y El Tié (Antioquia), de acuerdo con las últimas fotos aéreas rectificadas disponibles (años 2004 y 2009, respectivamente).
- b. Las líneas de costa históricas corresponden al año 1938 para Los Córdoba, Minuto de Dios y Tié, y 1975 para Arboletes.
- c. Los cuatro escenarios de ascenso del NMM se encuentran dentro del rango de predicciones de ascenso eustático para 2100 (entre 2.89 y 22.31 mm/año, Meehl *et al.*, 2007; Pfeffer *et al.*, 2008; Vermeer y Rahmstorf, 2009; Jevrejeva *et al.*, 2010): *v.gr.* 2.32 (actual según altimetría por satélite), 7.0, 10.0 y 22.0 mm/año.
- d. Fueron utilizadas dos ecuaciones de predicción, SCAPE (Walkden y Dickson, 2008) y Sunamura (Sunamura, 1992), obteniéndose resultados diferentes al comparar los resultados de un mismo sector (95% de confianza estadística). No obstante, se ha hecho énfasis en las magnitudes de SCAPE debido a su concepción exclusiva para predecir la evolución decadal de perfiles acantilados de rocas blandas.
- e. Las condiciones reproducidas se consideran prístinas, es decir, el retroceso de los acantilados en los sitios elegidos está vinculado con procesos naturales sin intervenciones antrópicas. En este punto en particular, existe la certeza sobre la construcción de obras de defensa costera (rompeolas de rocas) en la franja litoral entre la playa principal de Arboletes y la desembocadura del río Jobo, por lo cual las predicciones de este sitio pueden considerarse meramente ilustrativas.

A continuación se presentan los resultados más relevantes para cada sector, acompañados de su visualización geográfica de las líneas de costa en el mosaico de aerofotografías rectificadas de 2009.

5.2.1. *Los Córdoba – Puerto Rey*

(Figura 5.8, Tabla 5.1)

1. Magnitudes históricas promedio: -3.70 m/año y -243 m entre 1938 y 2004 (desviación estándar: 3.16 m/año).
2. Transecto de mayor distancia histórica: -1.55 km de distancia, asociados con -23.5 m/año. En consecuencia, las líneas de costa predichas muestran una cola en su parte oriental debido a la dirección de los transectos ubicados en la actual Punta Rey, que incluso se sale de la imagen de las fotografías aéreas de 2009.

5.2.2. *Minuto de Dios*

(Figura 5.9, Tabla 5.2)

1. Magnitudes históricas promedio entre 1938 y 2009: -1.63 m/año, -81.72 m.
2. La desviación estándar es menor que en Los Córdoba, evidenciando mayor homogeneidad en las magnitudes predichas (-0.58 m/año).
3. Transecto de mayor retroceso -3.03 m/año.

5.2.3. *Arboletes*

(Figura 5.10, Tabla 5.3)

1. Magnitudes históricas promedio entre 1975 y 2009: -1.29 m/año y -64.33 m (desviación estándar 0.46 m/año).
2. Transecto de mayor valor: -2.86 m/año.

5.2.4. *El Tié*

(Figura 5.11, Tabla 5.4)

1. Magnitudes históricas promedio entre 1938 y 2009: -3.02 m/año y -150.97 m (desviación estándar de -0.35 m/año, más baja entre los sectores).

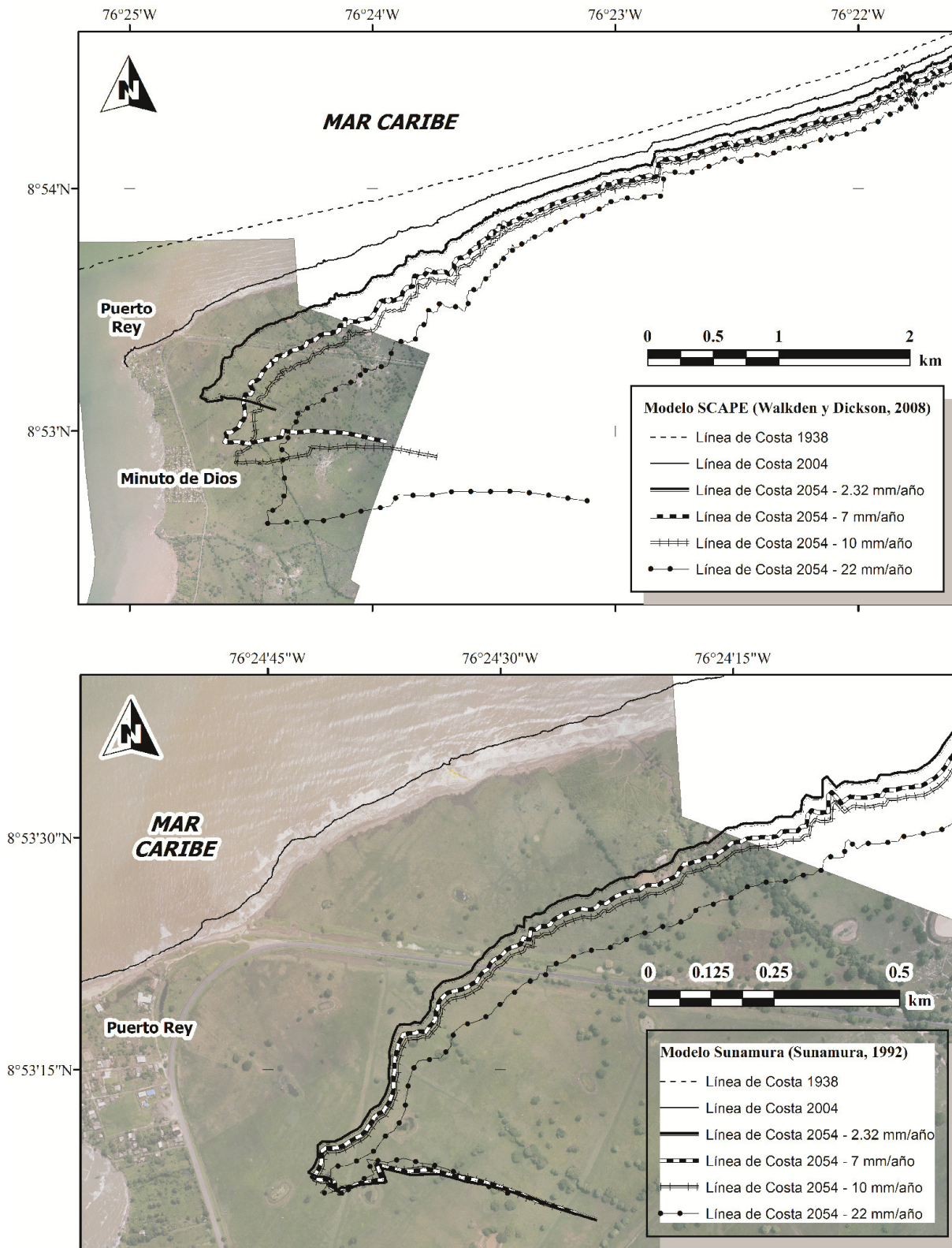


Figura 5.8. Líneas de costa sugeridas para 2054 en Los Córdoba a partir de los modelos SCAPE y Sunamura considerando escenarios de ascenso del nivel del mar. Se presentan las líneas de costa de 1938 y 2004 (para el modelo de Sunamura no se muestra la línea de costa de 1938 dada la escala de la imagen). En el fondo se observa el mosaico de aerofotografías ortorrectificadas realizado en 2009 por la empresa Aeroestudios S.A.

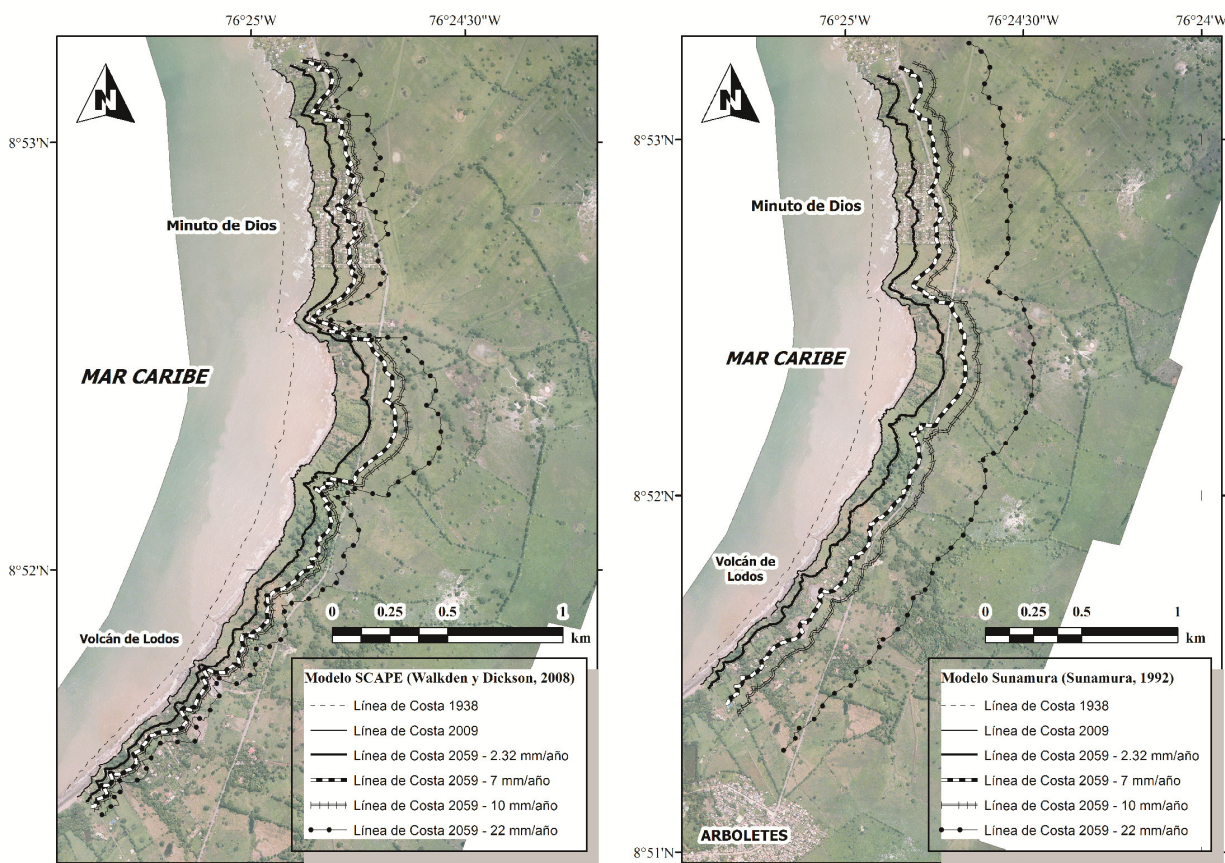


Figura 5.9. Líneas de costa en 2059 calculadas a partir de los modelos de Sunamura y SCAPE en el sector de Minuto de Dios, considerando varios escenarios de ascenso del nivel del mar en Antioquia. Se presentan, a su vez, las líneas de costa de 1938 y 2009. La imagen aérea corresponde al mosaico ortorrectificado de aerofotografías del año 2009 tomadas por Aeroestudios S.A.

Tabla 5.1. Resumen de los valores estadísticos de tendencia central de las magnitudes de erosión predichas para el sector de Los Córdoba en el año 2054, teniendo en cuenta varios escenarios de ascenso del NMM en Antioquia.

Sitio	Año			Tasa Ascenso Nivel del Mar (mm/año)	Método	Tasa Media Futura (m/año)	Desviación Estándar TMF (m/año)	Distancia Media Futura (m)	Desviación Estándar DMF (m)
	Histórica	Actual	Predicción						
Los Córdoba	1938	2004	2054	2.32	SCAPE	-3.70	3.16	-184.75	157.81
					Sunamura	-3.70	3.16	-184.75	157.81
				7.0	SCAPE	-6.42	5.48	-320.92	274.11
					Sunamura	-4.47	2.90	-223.36	144.75
				10.0	SCAPE	-7.67	6.55	-383.57	327.63
					Sunamura	-4.96	2.73	-248.10	136.39
				22.0	SCAPE	-11.38	9.72	-568.93	485.95
					Sunamura	-6.94	2.06	-347.09	102.92

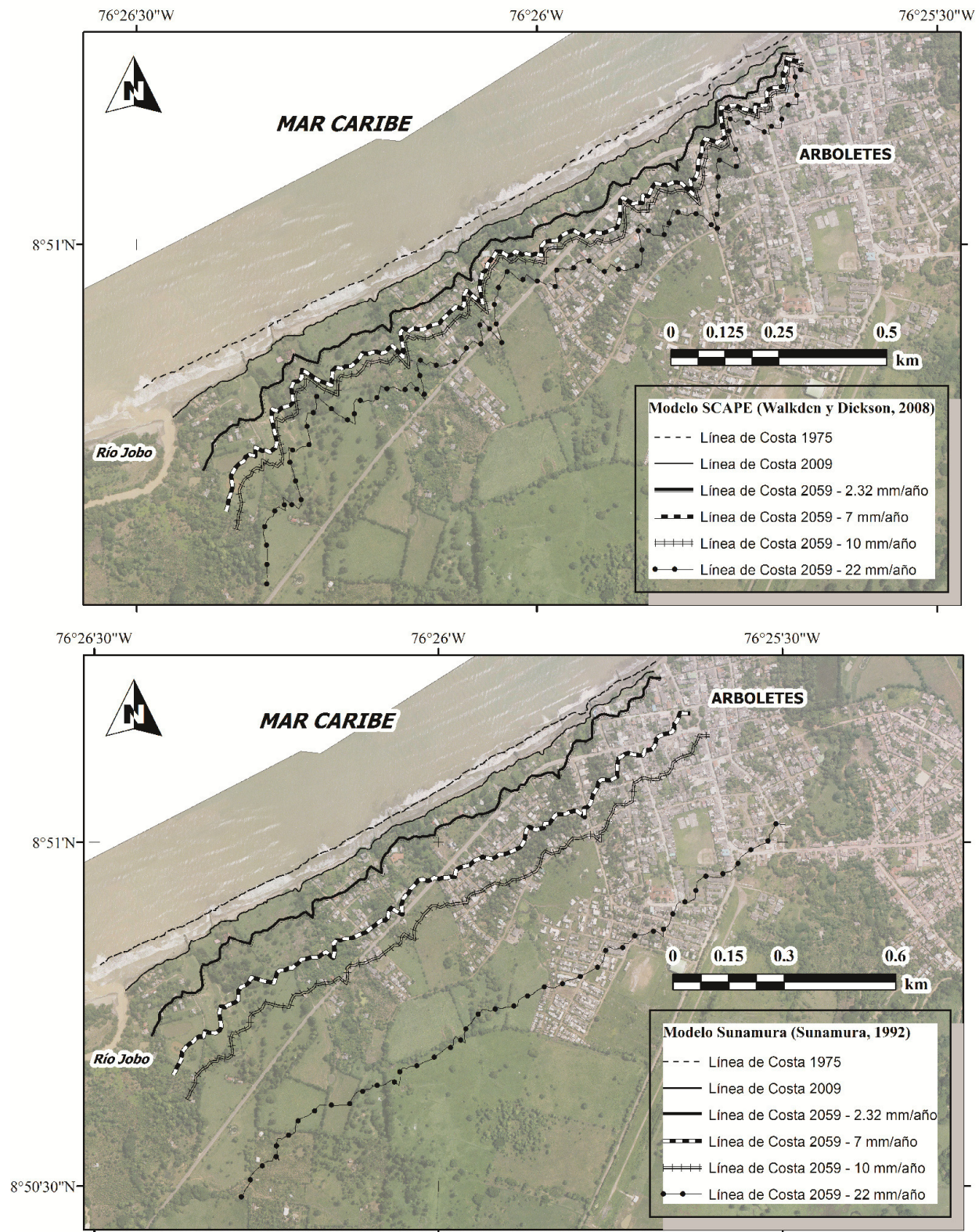


Figura 5.10. Ubicación predicha para la línea de costa de Arboletes en 2059 a partir de los modelos utilizados, y considerando diversos escenarios de ascenso del NMM, mostrando también las líneas de costa de 1975 y 2009. Esta predicción, sin embargo, es ilustrativa de las condiciones anteriores a la construcción de los rompeolas actuales. En el fondo se observa el mosaico rectificado de 2009 de Aeroestudios S.A.

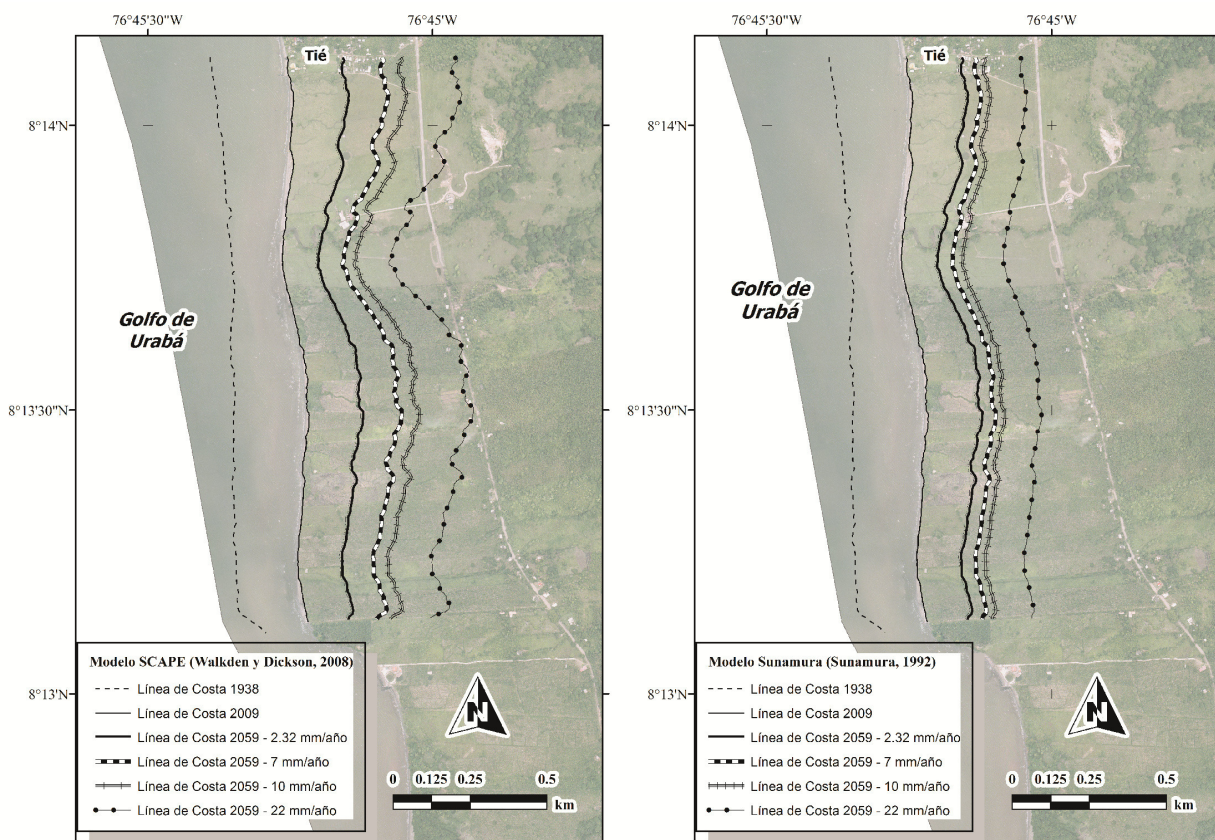


Figura 5.11. Líneas de costa del sector de El Tié en 2059, calculadas con los modelos de Sunamura y SCAPE para varios escenarios de ascenso del NMM. Nótese las líneas de costa de 1938 y 2009 cartografiadas a partir de mosaicos ortorectificados de fotografías aéreas realizados por Aeroestudios S.A. En la imagen se muestra la parte correspondiente del mosaico de 2009.

Tabla 5.2. Valores promedio y desviaciones estándar para las magnitudes de retroceso de línea de costa predichas a 2059 en el sector de Minuto de Dios, considerando diferentes escenarios de ascenso del NMM.

Sitio	Año			Tasa Ascenso Nivel del Mar (mm/año)	Método	Tasa Media Futura	Desviación Estándar TMF	Distancia Media Futura	Desviación Estándar DMF
	Histórica	Actual	Predicción			(m/año)	(m/año)	(m)	(m)
Minuto de Dios	1938	2009	2059	2.32	SCAPE	-1.63	0.58	-81.72	29.07
					Sunamura	-1.63	0.58	-81.72	29.07
				7.0	SCAPE	-2.84	1.01	-141.96	50.50
					Sunamura	-3.95	0.53	-197.35	26.48
				10.0	SCAPE	-3.39	1.21	-169.67	60.36
					Sunamura	-5.43	0.50	-271.46	24.83
				22.0	SCAPE	-5.03	1.79	-251.66	89.52
					Sunamura	-11.36	0.36	-567.93	18.19

Tabla 5.3. Estadísticos de tendencia central (promedio y desviación estándar) correspondientes al retroceso predicho en 2059 para Arboletes teniendo en cuenta varios escenarios de ascenso del NMM.

Sitio	Año			Tasa Ascenso Nivel del Mar (mm/año)	Método	Tasa Media Futura (m/año)	Desviación Estándar TMF (m/año)	Distancia Media Futura (m)	Desviación Estándar DMF (m)
	Histórica	Actual	Predicción						
Arboletes	1975	2009	2059	2.32	SCAPE	-1.29	0.46	-64.33	22.92
					Sunamura	-1.29	0.46	-64.33	22.92
				7.00	SCAPE	-2.23	0.80	-111.74	39.82
					Sunamura	-3.69	0.44	-184.48	21.95
				10.0	SCAPE	-2.67	0.95	-133.56	47.60
					Sunamura	-5.23	0.43	-261.50	21.32
				22.0	SCAPE	-3.96	1.41	-198.10	70.60
					Sunamura	-11.39	0.38	-569.59	18.82

Tabla 5.4. Estadísticos de tendencia central (promedio y desviación estándar) de las magnitudes de erosión predichas para 2059 en el sector de El Tié, considerando varios escenarios de ascenso del NMM.

Sitio	Año			Tasa Ascenso Nivel del Mar (mm/año)	Método	Tasa Media Futura (m/año)	Desviación Estándar TMF (m/año)	Distancia Media Futura (m)	Desviación Estándar DMF (m)
	Histórica	Actual	Predicción						
El Tié	1938	2009	2059	2.32	SCAPE	-3.02	0.35	-150.97	17.30
					Sunamura	-3.02	0.35	-150.97	17.30
				7.0	SCAPE	-5.24	0.60	-262.24	30.05
					Sunamura	-3.98	0.32	-198.89	15.76
				10.0	SCAPE	-6.27	0.72	-313.44	35.92
					Sunamura	-4.59	0.30	-229.61	14.77
				22.0	SCAPE	-9.30	1.07	-464.91	53.27
					Sunamura	-7.05	0.22	-352.47	10.83

5.2.5. Valores medios de retroceso más probables a 2054 y 2059

De acuerdo con Pfeffer *et al.* (2008), el escenario más probable de ascenso del NMM entre 1990 y 2100 es 0.833 m, que corresponde a *ca.* 8.33 mm/año de velocidad de ascenso. Los resultados de SCAPE para este escenario se adjuntan en la **Tabla 5.5**, teniendo en cuenta todos los sitios de predicción.

Tabla 5.5. Magnitudes promedio de retroceso más probable en los sitios considerados. Estas magnitudes fueron calculadas para el escenario de ascenso del NMM de 8.33 mm/año de Pfeffer *et al.* (2008) utilizando la ecuación SCAPE.

Sitio	Tasa ascenso del NMM más probable (mm/año)	Tasa retroceso promedio asociada (m/año)	Distancia retroceso promedio (m)
Los Córdoba	8.33	-7.00	-350.08 (año 2054)
Minuto de Dios		-3.10	-154.86 (año 2059)
Arboletes		-2.44	-121.89 (año 2059)
El Tié		-5.72	-286.07 (año 2059)

5.3. Resumen Resultados

Los resultados de este estudio están divididos en dos grupos: (1) cálculo de la migración de la línea de costa de 1938 a 2009 entre Punta Caribaná y Bahía Colombia, expresado en tasas de migración y valores de áreas ganadas o perdidas; y (2) velocidades de retroceso esperadas ante un eventual aumento en la tasa actual de ascenso del NMM, que significarían posiciones asociadas de la línea de costa para un año determinado, 50 años desde la última línea de costa cartografiada en zonas de acantilados blandos de Los Córdoba, Minuto de Dios, Arboletes y El Tié.

Con respecto a la migración histórica de la línea de costa, sobresale la ganancia de terrenos, ubicada casi en su totalidad en los deltas fluviales (+12.8 km² contra 9.7 km² de erosión), con tasas de avance promedio asociadas entre +15.2 y +16.4 m/año en las desembocaduras de los ríos Turbo, Guadualito y Currulao. En promedio, las tasas de retroceso histórico no superan los -3.2 m/año (El Tié), y se ubican en las franjas litorales comprendidas por los deltas mencionados.

Por otra parte, para la predicción en acantilados blandos se utilizaron dos ecuaciones matemáticas que consideran escalas espacio-temporales de décadas a centurias: Sunamura y la ecuación simplificada del modelo SCAPE. Las predicciones realizadas para un mismo sitio utilizando ambas ecuaciones son diferentes (nivel de confianza del 95%), dándosele mayor credibilidad a los resultados de SCAPE por su concepción y aplicación exclusiva para acantilados blandos. En este caso, y si se tiene en cuenta la tasa de ascenso del nivel del mar propuesta más probable según la literatura científica, se predicen distancias promedio de retroceso entre Los Córdoba y Puerto Rey de -350.1 m (año 2054), -154.9 m en Minuto de Dios (2059), -121.9 m en Arboletes (2059) y -286.4 m en El Tié (2059).

