

Nivel relativo del mar en la costa pacífica sur de Colombia: variabilidad, tendencias e implicaciones en la dinámica deltaica

RELATIVE SEA LEVEL ON THE SOUTHERN PACIFIC COAST OF COLOMBIA: VARIABILITY, TRENDS AND IMPLICATIONS ON DELTA DYNAMICS

SERGIO A. López¹
HÉCTOR Mora Páez¹
CAMILO A. Monroy²

JUAN D. Restrepo²
JUAN C. Restrepo³
EFRAÍN Rodríguez-Rubio⁴

RESUMEN

De acuerdo con el análisis de la serie del nivel relativo del mar (NRM) de Tumaco entre 1953 y 2006, las anomalías positivas del NRM muestran una buena coherencia con la curva del Índice de Oscilación del Sur (IOS) en el periodo de 54 años. Las variaciones en el IOS explican 61% de la variabilidad estacional en el nivel del agua ($r^2 = 0,61$, $p < 0,05$); los picos de mayor anomalía ocurrieron en los años El Niño de 1982-1983 y 1997-1998, alcanzando hasta 30 cm por encima de los promedios mensuales interanuales. También se estimó la tasa general de descenso del NRM en 0,60 mm año, y se identificaron dos subgrupos de datos con altas tasas de cambio y tendencias diferentes: el primero entre 1953 y 1979, con descenso de 4,7 mm año⁻¹; el segundo, de ascenso, entre 1984 y 2006, con 4,7 mm año⁻¹. El punto de quiebre de la serie coincide con ocurrencia del terremoto de Tumaco de 1979 ($M_w = 8,2$), por lo que este cambio en la tendencia del NRM se explicó mediante el modelo teórico de dislocación para la acumulación y liberación de la deformación en zonas de subducción. Las variaciones en la curva de diferencias integrales (CDI) para la serie del caudal del río Mira 1981-2002 sugieren el paso de un incremento de la humedad en la cuenca fluvial (1981-1987) a otro que corresponde a una disminución en la capacidad hidrológica (1988-2002). La dinámica reciente del delta mostró un proceso continuo de progradación entre 1958 y 1987. Después del sismo de 1979, el ascenso del nivel relativo del mar, los eventos El Niño de 1982 y 1983, y la inflexión de la curva de aporte fluvial pueden explicar el cambio a una fase de erosión marina lenta en el frente deltaico.

Palabras clave

Nivel del mar, delta del Mira, deformación, subducción, morfodinámica.

ABSTRACT

According to the relative sea level (RSL) data series from Tumaco 1953-2006, the positive sea-level anomalies show a good coherence with the Southern Oscillation Index (SOI). The variability of the SOI explains 61% of the seasonal variability in the water level data ($r^2 = 0.61$, $p < 0.05$). Maximum peaks appear in the 1982-1983 and 1997-1998 El Niño years, which were approximately 30 cm above the interannual monthly mean. The long term sea-level trend was decreasing at 0.60 mm/yr. Two subgroups of sea-level data with changing trends were identified: first (1953-1979), a decreasing trend of 4.7 mm/yr; second, an increasing trend rising at a rate of 4.7 mm/yr. The break of the series coincides with the occurrence of the 1979 great Tumaco earthquake ($M_w = 8.2$). That rate of change in the RSL subgroups could be explained through the theoretical dislocation model of strain accumulation and release at a subduction zone. Moreover, anomalies in water discharge of the Mira River (1981-2002) show an incrementally higher discharge in the drainage river basin between 1981 and 1987 and a diminishing trend in the discharge between 1988 and 2002. Recent delta dynamics show a continuous progradation proceeding between 1958 and 1987. After the 1979 earthquake, relative sea level rise, the 1982-1983 El Niño events and decreased river input may explain the change to a slow coastal erosion stage at the delta front.

Key words

Sea-level, Mira delta, deformation, subduction, morphodynamics.

Artículo recibido el 19 de diciembre de 2008. Aprobado el 30 de diciembre de 2008.

INGEOMINAS, Proyecto GEORED. Bogotá, Colombia. slopez@ingeominas.gov.co, hmora@ingeominas.gov.co

Universidad EAFIT, Programa de Maestría en Ciencias de la Tierra. Medellín, Colombia. cmonroy@eafit.edu.co, jdrestre@eafit.edu.co

³ Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, CIOH, Área de Manejo Integrado de Zonas Costeras. Cartagena, Colombia. jrestrepo@dimar.mil.co

⁴ Centro de Control de Contaminación del Pacífico, CCCP, Área de Oceanografía Operacional. Tumaco, Colombia. erodriguez@dimar.mil.co

Introducción

El nivel del mar es una función de la superficie oceánica y está controlado por el volumen de agua de los océanos, el volumen de las cuencas oceánicas y la distribución del agua en los océanos. Otros procesos geológicos, como la deformación de la corteza terrestre y la compactación de los sedimentos, controlan la elevación de las zonas costeras y, por tanto, el nivel del mar. Las diversas causas de la variabilidad en el nivel del mar pueden operar global y localmente en un amplio rango de escalas de tiempo que incluyen días, semanas (mareas, tormentas), periodos estacionales (cambios estéricos, clima), 10^0 – 10^4 años (clima, tectónica) y hasta millones de años (evolución de cuencas oceánicas). En el presente, la tasa de ascenso global del nivel del mar está definida por dos factores fundamentales: la expansión térmica de los océanos por absorción de calor de las aguas superficiales y la transferencia de agua del continente a los océanos (IPCC, 2007 & FitzGerald et ál., 2008).

Desde el punto de vista de la dinámica de los sistemas deltaicos, el aporte fluvial y los cambios en el nivel del mar han sido los procesos de mayor importancia en la morfología, estabilidad y evolución reciente de los deltas modernos en diferentes escalas temporales (10^0 a 10^3 años) (Parker et ál., 2004; Ericson et ál., 2006 & Hori y Saito, 2008, pp. 214-231). Los procesos marinos inciden en el frente deltaico en función de la geometría de la cuenca receptora (espacio disponible), que a su vez depende de la tectónica local, la isostasia, la batimetría de la plataforma continental exterior y la tendencia en el ascenso efectivo del nivel del mar (definido como la combinación de factores –cambio eustático, tasas de depositación fluvial y subsidencia en el delta, y la eventual subsidencia acelerada debida a la extracción de agua e hidrocarburos en el plano deltaico). En los mayores deltas del mundo, la canalización de distributarios, las actividades agrícolas y la explotación subterránea de recursos naturales (con subsidencia asociada) han tenido una incidencia importante en el incremento de las tasas de erosión litoral y en el aumento del nivel del mar. La disminución

de los aportes fluviales, inducida por la retención de los sedimentos en reservorios artificiales aguas arriba y por la desviación del flujo, es la principal variable que ha determinado la elevación efectiva del nivel del mar en casi 70% de los mayores deltas del mundo. Otro 20% experimenta subsidencia acelerada, mientras que solo 12% de estos deltas se caracteriza por presentar variaciones eustáticas en el nivel del mar como el efecto predominante (Ericson et ál., 2006; Syvitski y Saito, 2007; Syvitski, 2008 & Restrepo, 2008).

En costas tectónicas caracterizadas por la convergencia de placas tectónicas y subducción pueden ocurrir grandes diferencias en las tasas de cambio del nivel del mar en regiones próximas entre sí (distancias de 200 km o menores). Más aún, en dichos ambientes, la magnitud de la influencia tectónica puede originar comportamientos que enmascaran la tendencia actual de ascenso global del nivel del mar (Aubrey et ál., 1988; Rodríguez-Rubio y López, 2006; Restrepo y López, 2008 & Andrade, 2008). Aubrey et ál. (1988) asumieron que los datos mareográficos representan los cambios del nivel del mar y registran variaciones en el nivel de la costa, capaces de sobreponerse a los procesos eustáticos o de expansión térmica. Estos autores encontraron, para la margen oeste suramericana, que las series de los mareógrafos poseen una buena correlación con la profundidad de la zona de *Wadati-Benioff* en cada sector. Las altas tasas de levantamiento coinciden con la subducción de cordilleras submarinas (*ridges*) asísmicas; las áreas adyacentes exhiben tasas de levantamiento más bajas, incluso subsidencias donde subduce el piso oceánico normal.

Marco físico y antecedentes

En la región pacífica sur de Colombia, ha ocurrido una combinación única de procesos físicos y ambientes dinámicos:

1. La zona de trinchera del límite convergente Colombia-Ecuador se caracteriza por el desarrollo de un prisma acrecionario con alta sismicidad activa, que se asocia a la existencia de sistemas de cabalgamientos de tipo *megasplays* con alto potencial

tsunamigénico, donde se acumulan esfuerzos elásticos recuperables relacionados con el ciclo sísmico en la estructura de acople de las placas Nazca y Suramericana (Trenkamp et ál., 2002; Collot et ál., 2003 & Moore et ál., 2007).

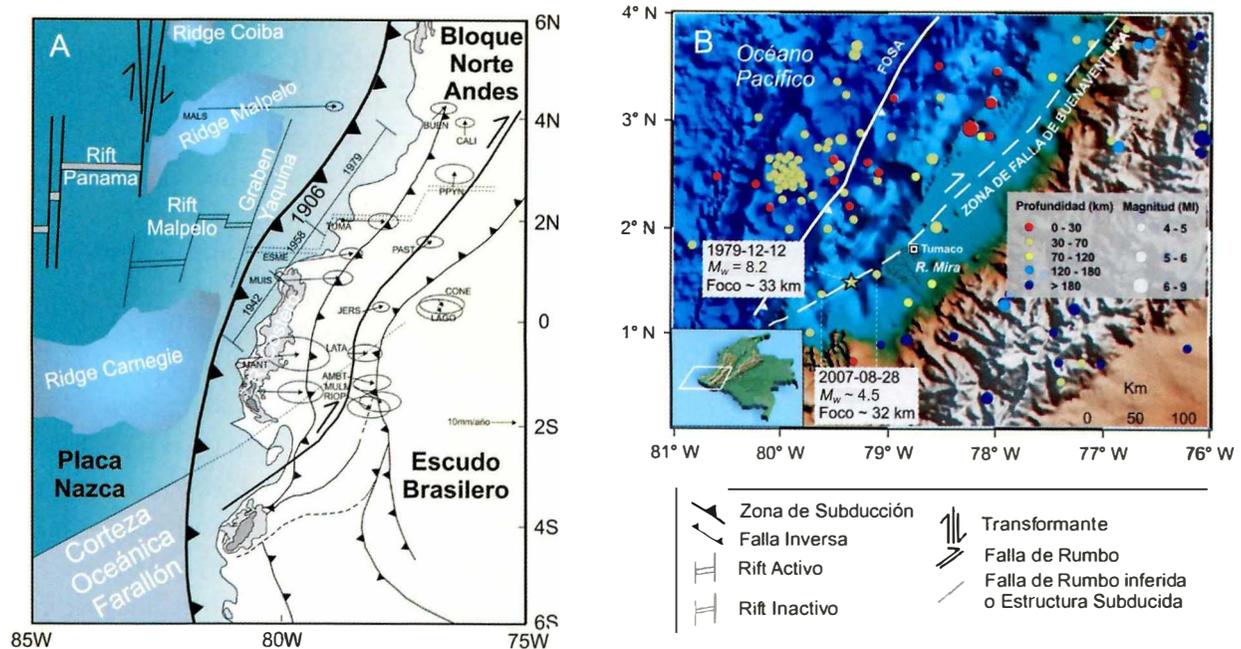
2. Durante el siglo XX, en esta zona ocurrió una secuencia de eventos mayores (1906 = M_w 8,8; 1942 = M_w 7,6; 1958 = M_w 7,7; 1979 = M_w 8,2), interpretada como uno de los mejores ejemplos de modelos de asperidad de ruptura por terremotos (Kanamori y McNally, 1982; Beck y Ruff, 1984; Swenson y Beck, 1996 & White et ál., 2003).

3. La presencia de un delta subaéreo extenso (delta del río Mira), prístino, que ha contrarrestado el alto potencial destructivo de procesos marinos y tectónicos extremos mediante el aporte continuo de grandes cantidades de sedimentos al litoral pacífico (Restrepo y López, 2008 & Restrepo et ál., 2009).

4. La ocurrencia de fuertes manifestaciones oceanográficas asociadas al fenómeno ENOS (El Niño

y la Oscilación del Sur) en el borde oriental del Pacífico, que producen anomalías interanuales en el nivel eustático del mar (Restrepo et ál., 2002, 2009; Restrepo y López, 2008) (figura 1).

En el sector norte del delta del río Mira, en la población costera de Tumaco (Nariño, al sur del litoral pacífico colombiano), se localiza un mareógrafo perteneciente al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), que ha permitido reconstruir las variaciones del nivel relativo del mar (NRM) durante las últimas cinco décadas. Entre los principales estudios de esta serie de datos se encuentran: Aubrey et ál. (1988), quienes determinaron que la costa de Tumaco se elevó a una tasa de $2,1 \text{ mm año}^{-1}$ (descenso del NRM) en el periodo comprendido entre 1953 y 1968; Andrade (2003, 2008), quien estudió una serie más extensa (1951-2000) y estimó una tendencia lineal de descenso del NRM de $0,80 \text{ mm año}^{-1}$ (descenso acumulado de 4 cm en 50 años), valor cercano al



► **Figura 1.** (A) Ambiente tectónico general del área de estudio con los principales rasgos estructurales, los vectores de velocidad de estaciones CASA y las zonas de ruptura de los terremotos de 1906, 1942, 1958 y 1979. La estación GPS TUMA muestra la ubicación aproximada del mareógrafo de Tumaco. (B) Mapa de distribución de sismos con $M_w > 4$ en la zona de subducción y los Andes de Ecuador-Colombia para el periodo 1993-2007. También se incluye la localización del delta del río Mira, municipio de Tumaco, y el epicentro del terremoto de 1979

Fuentes: Gutscher et ál., 1999; Trenkamp et ál., 2002; Cediél et ál., 2003 & INGEOMINAS, 2007.

encontrado por Restrepo y López (2008) para el intervalo 1953-2000 (descenso de $1,14 \text{ mm año}^{-1}$); Rodríguez-Rubio y López (2006), con descenso general del NRM de $0,50 \text{ mm año}^{-1}$ para el mismo periodo 1953-2000 de Restrepo y López (2008). Adicionalmente, Rodríguez-Rubio y López (2006) reportaron un cambio significativo en la tendencia entre 1993 y 2000 a ascenso del NRM en el orden de $5,2 \text{ mm año}^{-1}$, interpretado como la respuesta costera a un periodo postsísmico al evento de 1979, en el que se liberó la deformación elástica almacenada, dando como resultado subsidencia cosísmica (Herd et ál., 1981) y extensión horizontal en los lugares donde se había acumulado un leve levantamiento con acortamiento horizontal (Meyer, com. pers.). Las diferencias en las tasas de cambio del nivel del mar entre los estudios citados, se deben al intervalo temporal considerado en cada caso y a los métodos empleados en los cálculos estadísticos, en la aplicación de filtros, factores de corrección e interpolación numérica del registro faltante.

Objetivos

Con base en los métodos de análisis, contribuciones e interrogantes de Aubrey et ál. (1988), Restrepo et ál. (2002), Andrade (2003, 2008), Pugh (2004), Rodríguez-Rubio y López (2006), y Restrepo y López (2008), entre otros, utilizados para determinar la variabilidad del nivel del mar en el pacífico colombiano a partir de registros mareográficos, el presente artículo tiene como objetivos: identificar las anomalías oceanográficas más representativas de las condiciones El Niño; analizar la relación entre el comportamiento de las tendencias de la serie de tiempo filtrada antes y después del terremoto de Tumaco de 1979, con el modelo general de dislocación para la acumulación y liberación de esfuerzos en zonas de subducción; y estudiar el balance de procesos climáticos, hidrológicos y oceanográficos que interactúan en el delta del río Mira, en el contexto de los cambios observados del NRM y de las descargas fluviales a la zona litoral.

Datos y métodos

La serie de datos horarios 1953-2006 para el mareógrafo de Tumaco ($1^{\circ}50'N-78^{\circ}44'W$) fue obtenida del University of Hawaii Sea Level Center/NOAA (UHSLC, 2005) y del IDEAM (2007). Originalmente, el registro estaba completo en 86%. Los datos faltantes fueron estimados mediante interpolación numérica con ayuda del programa TIDES (Franco, 1992). A partir de dicha información se calculó una serie mensual ponderada y filtrada con el fin de evaluar las anomalías del NRM en la zona litoral del delta del Mira con relación al fenómeno El Niño y la Oscilación del Sur (ENOS). La serie de tiempo del NRM fue promediada y sometida al análisis de regresión lineal simple para determinar tendencias según los procedimientos expresados en Pugh (2004).

Con el fin de establecer la variación morfológica temporal del plano deltaico del Mira, así como de la línea de costa, y establecer tasas preliminares de erosión y acreción, se procesaron imágenes Landsat TM con una resolución de 30 m del Global Land Cover Facility de la Universidad de Maryland para el periodo 1986-2000 (GLCF, 2007). Las imágenes fueron procesadas con el programa ENVI Image 4.3 para obtener mosaicos de color verdadero. Esta combinación permite discriminar aguas poco profundas, aguas turbias, corrientes, batimetría y zonas de depósitos sedimentarios. Sobre las imágenes se definió el límite húmedo-seco mediante el trazo de vectores a partir de la clasificación no supervisada. Se utilizaron fotografías aéreas IGAC del sector de desembocadura principal del delta, correspondientes a 1958 y 1993 a escala 1:40.000 (IGAC, 2007), lo que permitió aumentar el espectro de tiempo sobre el cual se establecieron los cambios en la configuración del delta en las últimas cinco décadas. Para estas fotografías se definió la línea de costa mediante la identificación de la línea húmedo-seca, y se delimitaron las principales geoformas litorales y fluviales. También se documentaron cambios en la línea de costa por medio del análisis de mapas ba-

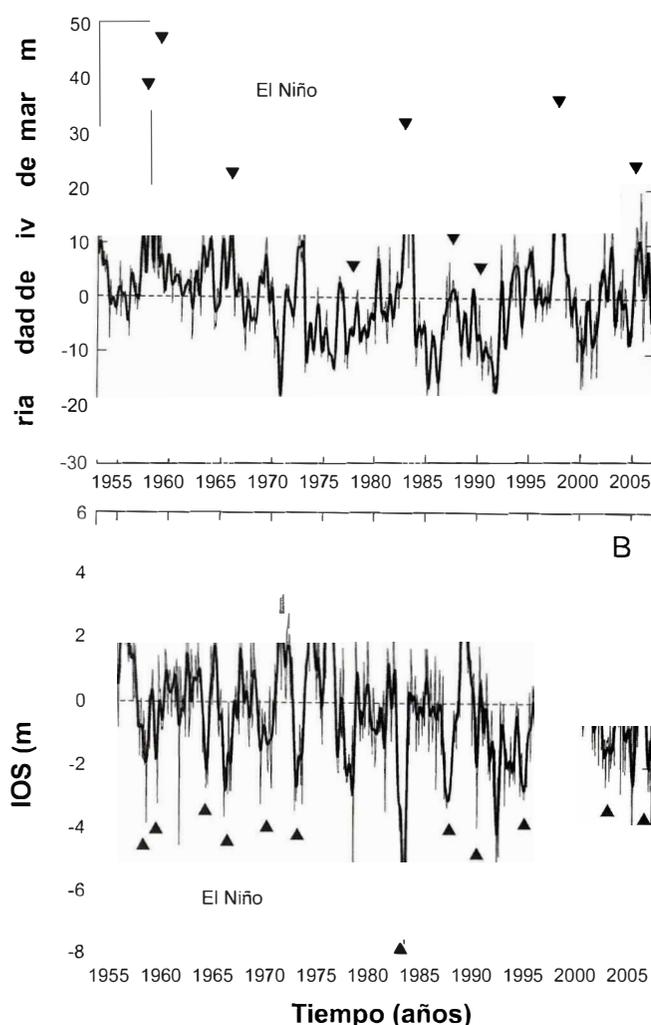
timétricos a escala 1:100.000 y entrevistas con los habitantes del área.

Otras variables fueron consideradas con el propósito de analizar la evolución reciente del sistema deltaico, según el balance de aporte de sedimentos continentales vs. cambios del NRM. Específicamente, se realizaron estimaciones de la hidrología general del río Mira en la estación más próxima al plano deltaico (estación limnigráfica San Juan) con base en los datos diarios del caudal entre los años 1981 y 2002, obtenidos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM, 2007). Para la construcción de la Curva

de Diferencias Integrales (CDI), se calcularon los valores acumulados de la diferencia entre los promedios mensuales estandarizados y el promedio interanual.

Variabilidad y tendencias del nivel relativo del mar

En Tumaco, las anomalías positivas del NRM muestran una buena coherencia con la curva del Índice de Oscilación del Sur (IOS) en el periodo de 54 años (figura 2). El análisis de regresión entre ambas curvas filtradas arrojó un coeficiente de variación (r^2) = 0,61, significativo en un nivel de

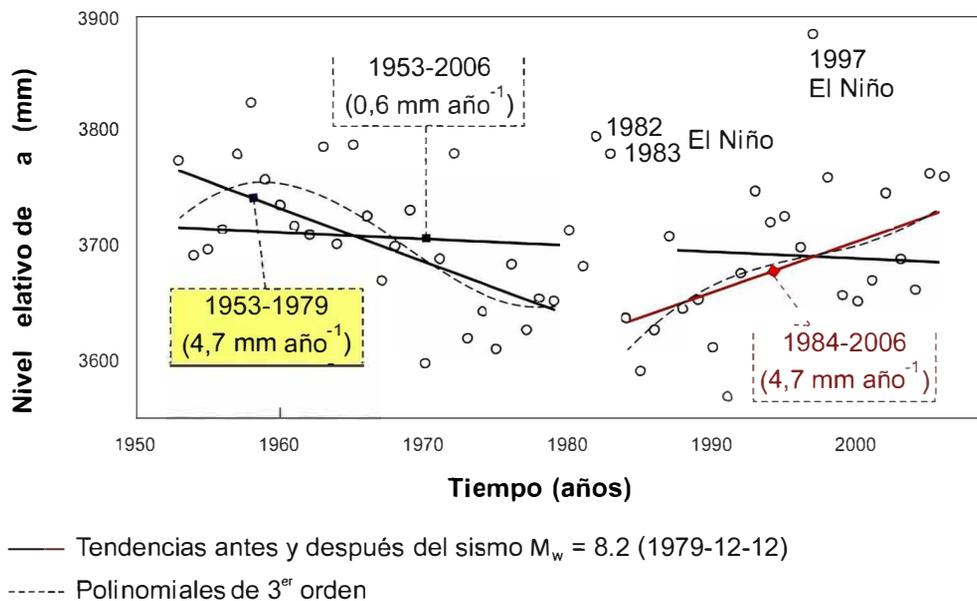


■ **Figura 2.** (A) Serie de tiempo 1953-2006 de las anomalías del nivel del mar (cm) para la estación mareográfica de Tumaco (línea delgada), a la cual se le aplicó un filtro de paso bajo Butterworth con fase cero para remover efectos estacionales (serie filtrada: línea gruesa). (B) Índice de Oscilación del Sur (IOS), que corresponde a la diferencia de la presión atmosférica (milibar) entre Darwin (Australia) y Tahití. Estos datos fueron obtenidos de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de Estados Unidos, <http://ftp.ncep.noaa.gov/pub/cpc/wd52dg/data/indices>.

confianza de 95%, lo cual indica que las variaciones en el IOS explican 61% de la variabilidad estacional en el nivel del agua. Martínez et ál. (2000), Morton et ál. (2000) y Restrepo et ál. (2002), entre otros, han documentado la influencia de la manifestación oceanográfica El Niño en las costas del Pacífico central colombiano, asociada a la ocurrencia de fenómenos de sobrelavado y erosión costera acelerada. Para el delta del río Mira, los picos de mayor anomalía registran alrededor de 30 cm de incremento con respecto a los promedios mensuales interanuales, y ocurrieron en los años 1982-1983 y 1997-1998 (figura 2). Esto es similar a lo observado para la serie de Buenaventura 1955-1999 por Restrepo et ál. (2002). Durante estos años, la región pacífica experimentó incrementos en la temperatura de la superficie del mar entre 2 y 5 °C (Morton et ál., 2000 & Restrepo et ál., 2002); localmente, en el sector de Milagros-Frontera (sistema principal de descarga del delta del río Mira), ocurrieron eventos de sobrelavado según narraciones de habitantes de la zona. Para el último evento significativo El Niño en el municipio de Tumaco (1997-1998), sector

norte del delta, habitantes locales reportaron inundaciones costeras con daños en la infraestructura física adyacente a la línea de costa.

En lo que concierne al estudio de la tendencia del NRM, en Tumaco el NRM está descendiendo a una tasa de 0,6 mm año⁻¹ para el periodo 1953-2006. La dispersión de los promedios anuales del NRM permitió diferenciar dos subgrupos de datos con altas tasas de cambio y tendencias diferentes: el primero entre 1953 y 1979, con descenso de 4,7 mm año⁻¹; segundo, de ascenso, entre 1984 y 2006, con 4,7 mm año⁻¹ (en este caso, fueron removidos de la serie los promedios de los años con mayor variabilidad por la incidencia del fenómeno El Niño: 1982, 1983 y 1997). La aplicación de ajustes polinomiales de tercer orden en las series de ambos subgrupos permitió visualizar con más precisión los cambios en la distribución de los datos (figura 3). Es de resaltar que el punto de quiebre de la serie de nivel del mar coincide con el tiempo de ocurrencia del último sismo tsunamigénico de mayor magnitud (12 de diciembre de 1979, $M_w = 8,2$) en la región noroccidental de Suramérica. En la zona



► **Figura 3.** Tendencias del nivel relativo del mar en Tumaco para el periodo 1953-2006 (descenso, pendiente = 0,6 mm año⁻¹) y para las series cortas 1953-1979 (descenso, pendiente = 4,7 mm año⁻¹) y 1984-2006 (ascenso, pendiente = 4,7 mm año⁻¹) a las cuales se les sobrepuso una curva polinomial de tercer orden. En el subconjunto de datos 1984-2006, se removieron los años El Niño de 1982, 1993 y 1997.

costera de Tumaco, este sismo ocasionó daños a infraestructura, licuefacción de sedimentos arenosos, agrietamiento del suelo y subsidencia cosísmica del orden de 0,15 a 0,30 m. Este evento dejó más de 200 pérdidas humanas, debido a la destrucción por el movimiento y el arribo de olas gigantes (Herd et ál., 1981).

Según información suministrada por la Red Sismológica Nacional de INGEOMINAS, entre junio de 1993 y septiembre de 2007 fueron registrados más de 120 sismos de magnitud $M_w > 4$ dentro de un radio de aproximadamente 200 km del delta del Mira, asociados a la deformación tectónica en el límite de subducción. Entre los últimos sismos con epicentros en la plataforma frontal del delta ($M_w \sim 4,5$) sobresalen los del 28 de agosto de 2007, a ~ 32 km de profundidad hipocentral y con pocos segundos de diferencia (figura 1) (INGEOMINAS, 2007).

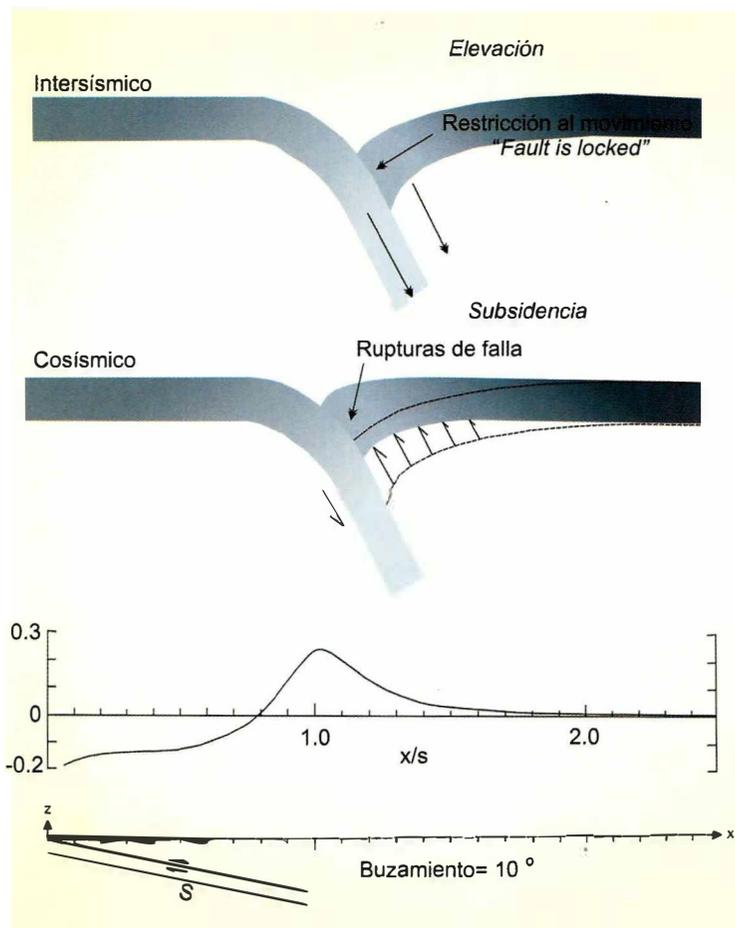
En el delta del Mira, el cambio en la tendencia multianual del NRM y el rápido ascenso planteado para las últimas dos décadas puede explicarse por el modelo general de dislocación para la acumulación y la liberación de la deformación en zonas de subducción (Savage, 1983; Stein y Wysession, 2003). Teóricamente, el movimiento intersísmico es modelado como la diferencia entre el movimiento de las placas a largo plazo y la deformación cosísmica de los grandes terremotos en los límites de placa (en este caso, el de Tumaco en 1979). Los movimientos intersísmicos ocurren en una zona límite que se extiende desde las fallas que definen el límite nominal de las placas. El modelo predice subsidencia intersísmica y movimiento en dirección al continente para la mayoría de los sitios en el sector donde hay restricción al movimiento sobre el plano de falla (*locked fault*), y levantamiento atrás de la margen continental (representado por los cambios de levantamiento y subsidencia costera en la serie del NRM) (figuras 3 y 4). De acuerdo con Savage (1983), los registros de levantamiento local en función del tiempo indican que la recuperación postsísmica es aproximadamente lineal, sugiriendo que los modelos que consideran a la Tie-

rra elástica son adecuados para describir el ciclo de la deformación.

Trenkamp et ál. (2002) y White et ál. (2003), mediante la aplicación de métodos GPS en el proyecto CASA (Central and South America GPS Project), determinaron para la zona de estudio lo siguiente:

1. La transferencia de movimiento de la placa oceánica Nazca, en convergencia oblicua con la placa continental Suramericana (~ 60 mm año⁻¹, asumiendo a Suramérica fija), es absorbida parcialmente en el continente y se refleja en el acortamiento cortical perpendicular a la margen andina. El movimiento restante se manifiesta en la tectónica de escape del Bloque Norandino (~ 6 mm año⁻¹) a través de sistemas transpresivos dextrales subparalelos a dicha margen.
2. El modelo elástico (*elastic half-space model*) de Savage (1983), aplicado a los desplazamientos horizontales GPS en el antearco de Ecuador-Colombia, es consistente con un bloqueo parcial en la zona de subducción del orden de 50%. Se asume que esta deformación refleja la acumulación de la deformación recuperable asociada a la sismicidad histórica del área, así como también el fallamiento continental activo evidenciado en el acortamiento permanente de 6 mm año⁻¹.

Visto el delta del río Mira en el contexto estructural anterior, se espera que a escala de décadas este sistema litoral experimente cambios marcados en el balance de los procesos físicos operantes, como se expone a continuación: Si se asume un suministro continuo de grandes cantidades de sedimentos al delta (como ocurre en la actualidad, según Restrepo y López, 2008), durante el tiempo de acumulación de la deformación elástica en la zona de acople, la zona costera (y el plano deltaico) se elevará causando un descenso relativo en el NRM, favoreciendo la progradación del sistema; mientras que en el momento de la liberación súbita de la energía sísmica y durante los años siguientes, la subsidencia cosísmica y postsísmica del plano deltaico, evidenciada en el ascenso del NRM, ocasionará cambios en el gradiente del plano deltaico con el posible incre-



► **Figura 4.** Arriba: dos estados del ciclo de los terremotos en zonas de subducción. Abajo: Movimiento vertical intersísmico predicho para una condición de restricción del movimiento en el plano de falla (*locked fault*) en zonas de subducción. El movimiento vertical está normalizado por la tasa de convergencia de la placa obstruida; la distancia horizontal está normalizada por la distancia entre la trinchera y el límite de la zona donde ocurre restricción al movimiento (modificado de Stein y Wyession, 2003).

mento en el potencial erosivo de los canales distributarios, la posibilidad de cambios abruptos de cauce y la apertura de nuevas bocananas (*inlets*), la mayor erosión costera por el incremento de sobrelavados asociados a tormentas o durante años El Niño, una mayor energía del oleaje en la costa por cambios en la batimetría de la plataforma subacuosa, una mayor indicencia mareal y de las corrientes litorales.

Estabilidad deltaica

De acuerdo con la serie de datos del IDEAM, el caudal promedio anual \pm rms en la estación más próxima al delta del Mira es $871 \pm 136 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; y los máximos ocurren en enero y mayo, con $1074 \pm 288 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y $1105 \pm 249 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, respectivamente. El periodo

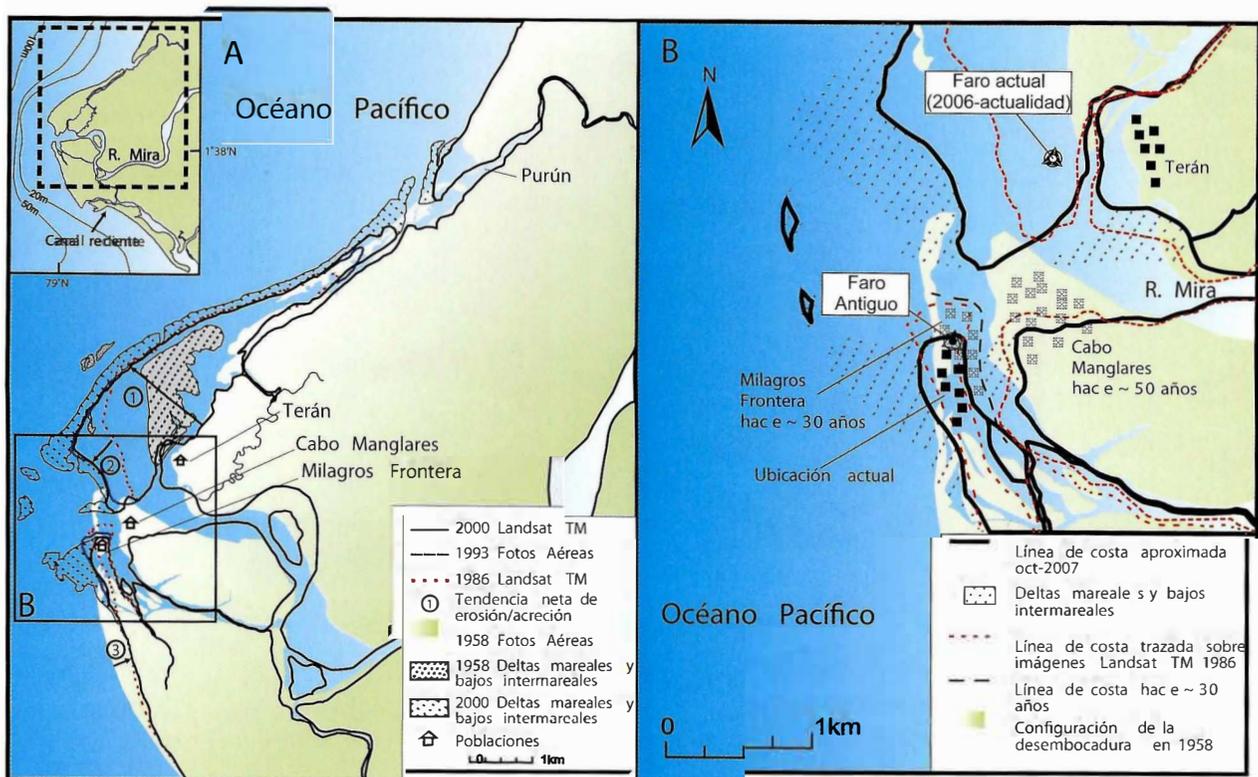
de mínima descarga corresponde a agosto, con $534 \pm 200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Durante los 22 años de monitoreo, el río Mira ha descargado a la zona litoral un volumen anual de agua de $\sim 27 \text{ km}^3$. Según Restrepo y López (2008) y Restrepo et ál. (2009), el transporte anual de sedimentos se estima en $\sim 9,8 \text{ Mt año}^{-1}$ y representa una tasa de denudación neta de $1025 \text{ t km}^{-2} \text{ año}^{-1}$. Este valor ocupa uno de los primeros lugares de producción de sedimentos entre los promedios calculados para toda la costa oeste suramericana al lado de los ríos Patía y San Juan en el Pacífico colombiano.

Según el análisis de imágenes de satélite Landsat y de fotografías aéreas IGAC para los últimos 50 años, los cambios experimentados en la línea

de costa en el área de la desembocadura principal reflejan eventos progradantes (por el aporte de sedimentos fluviales) y erosivos (por la acción de los procesos marinos destructivos). Durante el periodo de 1958 a 1986 la posición de la línea de costa y la morfología del frente del delta se vieron modificadas significativamente (figura 5). En el sector norte de la boca, donde se observan sucesiones de ganchos de progradación, se experimentó un aporte frontal y lateral importante, y la playa avanzó hacia el occidente aproximadamente 1,3 km a una tasa de 46 m año^{-1} . Desde Purún hasta Terán se formó un canal a lo largo del trazo aproximado de la línea de costa en 1958; el manglar colonizó los bajos frontales. Según los testimonios de habitantes locales y las fotografías aéreas, se pudo establecer que hacia la mitad del siglo pasado la línea de costa se localizaba en la población de Cabo Manglares; al norte de la desembocadura se localizaba el caserío de Terán. Durante este periodo (1958-2000), en la

margen sur ocurrió un retroceso significativo hacia el sur debido a la migración del canal, lo cual obligó a la relocalización progresiva de la población, en el mismo tiempo en que progradaba la espiga Isla Milagros. De acuerdo con los relatos de los pobladores del área, en una fecha cercana a 1986, se inició el traslado de la población de Cabo Manglares hacia Milagros, sitio donde se asienta actualmente (Monroy et ál., 2008).

En el periodo comprendido entre 1986 y 1993, en la margen norte de la desembocadura, continuó el crecimiento lateral hacia el interior de la boca en sentido suroeste a una tasa aproximada de 32 m por año; mientras que al sur, la espiga experimentó un robustecimiento continuo, así como retroceso en la parte interna, y aumentó la amplitud del canal interno entre Cabo Manglares y Milagros. Para el periodo comprendido entre 1993 y 2000 no se observó progradación en el sector norte. Los cambios más importantes ocurrieron

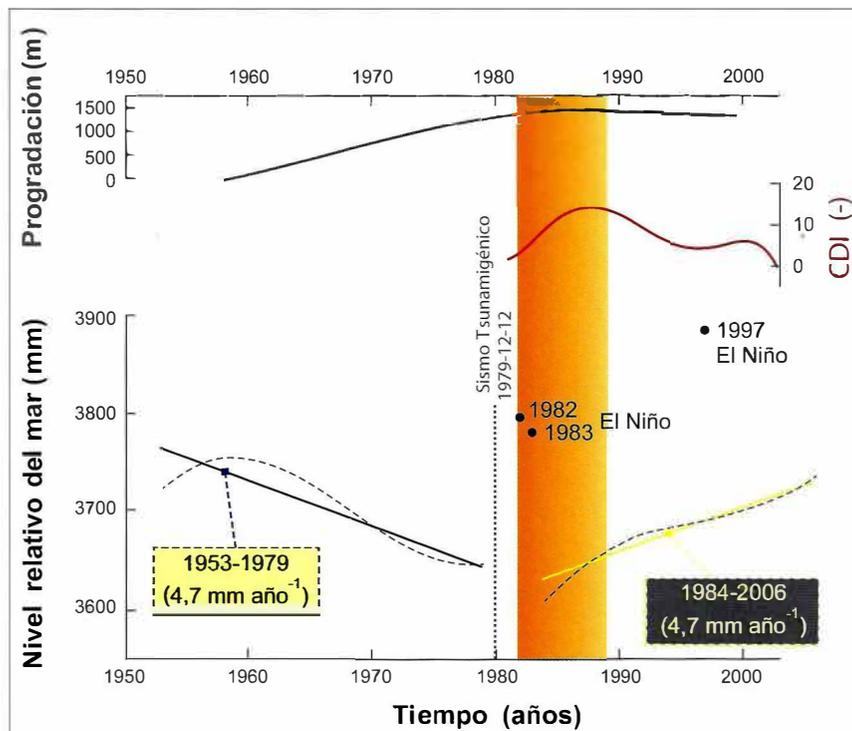


► **Figura 5.** (A) Cambios en la línea de costa en el sistema de desembocadura principal del delta del río Mira, definidos a partir del análisis de imágenes Landsat y fotografías aéreas IGAC. También se muestran los sectores donde ocurrieron los principales cambios de la línea de costa en términos de progradación (1, 2) y erosión (3). (B) Detalle que esquematiza además los cambios de ubicación de los asentamientos humanos según las narraciones de habitantes de la zona.

en Milagros, donde el retroceso de la espiga y el ensanchamiento del canal interno fueron constantes. Según entrevistas con los pobladores de la zona, el antiguo faro que se localizaba en el centro de la población de Milagros Frontera fue expuesto a la acción erosiva del oleaje y las corrientes del río, debido al continuo retroceso. Este proceso se revirtió y durante los últimos cinco años la playa experimentó una continua progradación, lo cual se evidencia en cordones litorales sucesivos (Monroy et ál., 2008) (figura 5).

Las comparaciones multitemporales (últimas cinco décadas) de la morfología deltaica en el sector de desembocadura principal, mostraron un proceso de progradación general hasta mediados de los años ochenta, tiempo a partir del cual la línea de costa ha estado sujeta a los efectos erosivos de los procesos marinos. La explicación del crecimiento del delta en condiciones destructivas parece estar

en las variaciones temporales de la escorrentía de la cuenca y, por consiguiente, en la capacidad de transporte de sedimentos a la zona litoral. La figura 6 muestra las anomalías del caudal por encima o por debajo del promedio interanual (media igual a cero) a través de la Curva de Diferencias Integrales (CDI). Esta curva sugiere el paso de un periodo de incremento de la humedad en la cuenca fluvial en el intervalo de 1981-1987 (exceso en la oferta hídrica) a otro entre 1988 y 2002, que corresponde a una disminución en la escorrentía y, por tanto, en la capacidad hidrológica del sistema. Al parecer, dicho exceso de la capacidad fluvial entre 1981 y 1987 favoreció la alta tendencia acumulativa en el frente del delta hasta mediados de los años ochenta, en oposición a: 1. Las condiciones marinas extremas del oleaje (energía moderada) y la actividad mareal (rangos mesomareales y tipo semidiurno) (Restrepo y López, 2008; Restrepo et ál., 2009); 2. La in-



► **Figura 6.** Variaciones en el potencial fluvial para el aporte de sedimentos al sistema litoral entre 1981 y 2002, expresadas en la curva de diferencias integrales-CDI (representada con una curva polinomial de cuarto orden), en comparación con las tendencias del nivel del mar antes y después del terremoto de Tumaco de 1979. También se incluyen en la gráfica los años El Niño de 1982, 1983 y 1997. La respuesta del delta en el sistema de desembocadura principal evidencia una progradación continua en el frente deltaico hasta mediados de los años ochenta (curva de progradación). El área sombreada después de la línea del sismo de 1979 indica la incidencia del ascenso del nivel relativo del mar, los eventos El Niño de 1982 y 1983, y la inflexión del aporte fluvial, para explicar el cambio de la respuesta costera a una fase de erosión lenta (modificado de Monroy et ál., 2008 & Restrepo, 2008).

tensidad de la afectación costera del fenómeno El Niño, especialmente en 1982 y 1983 (aunque, de acuerdo con los testimonios de pobladores de Milagros Frontera, durante estos años y también en 1992 y 1997 la costa estuvo sujeta a sobrelavados e incremento de la erosión frontal); y 3. La ocurrencia de un terremoto tsunamigénico de gran magnitud (12 de diciembre de 1979) con subsidencia cosísmica en el plano deltaico de hasta 0,3 m, entre otras expresiones superficiales del fallamiento (Herd et ál., 1981), a partir del cual cambió la tendencia del NRM a una fase reciente de ascenso con una tasa que debe considerarse muy alta ($4,7 \text{ mm año}^{-1}$). Para las últimas dos décadas, la inflexión del aporte fluvial hacia un periodo menos húmedo, y la persistencia del ascenso del NRM, pueden explicar el cambio de la respuesta costera a una fase de erosión marina lenta en el sistema principal de desembocadura del río Mira.

Síntesis

Las anomalías positivas del NRM en Tumaco muestran una buena coherencia con la curva del Índice de Oscilación del Sur (IOS) en el periodo de 54 años. Las variaciones en el IOS explican 61% de la variabilidad estacional en el nivel del agua; los picos de mayor anomalía ocurrieron en los años El Niño de 1982-1983 y 1997-1998, alcanzando hasta 30 cm por encima de los promedios mensuales interanuales. La tasa general de descenso del NRM es $0,60 \text{ mm año}^{-1}$; a esta se superponen dos subgrupos de datos: el primero entre 1953 y 1979, con descenso de $4,7 \text{ mm año}^{-1}$; el segundo, de ascenso, entre 1984 y 2006, con $4,7 \text{ mm año}^{-1}$. El punto de quiebre de la serie coincide con la ocurrencia del terremoto de Tumaco de 1979 ($M_w = 8,2$), por lo que este cambio se explicó mediante el modelo teórico de dislocación para la acumulación y liberación de la deformación en zonas de subducción.

Las variaciones en la curva de diferencias integrales (CDI) para la serie del caudal del río Mira, sugieren el paso de un incremento de la humedad en la cuenca fluvial (1981-1987) a otro que corresponde a una disminución en la capacidad hidroló-

gica (1988-2002). La dinámica reciente del delta mostró un proceso continuo de progradación entre 1958 y 1987. Después del sismo de 1979, el ascenso del nivel relativo del mar, los eventos El Niño de 1982 y 1983, y la inflexión de la curva de aporte fluvial pueden explicar el cambio a una fase de erosión marina lenta en el frente deltaico.

Incertidumbres en la serie del nivel del mar y comentarios finales

Un problema importante que debe considerarse cuando va a analizarse la serie del NRM de Tumaco es que es necesario ajustar el nivel de referencia del instrumento donde es obvia la alteración por problemas en la manipulación del equipo. Los espacios vacíos en el registro pueden deberse a la incertidumbre del nivel de referencia o a cambios en la posición del sensor (Andrade, 2003, 2008). Para completar la serie, debe acudir a programas de interpolación numérica (Franco, 1992). Atendiendo a la necesidad actual de mejorar y densificar la instrumentación para el estudio del nivel del mar en las costas y zonas insulares del Pacífico colombiano, el Centro de Control de Contaminación del Pacífico (CCCP) instaló recientemente en Tumaco una estación mareográfica adecuada para el monitoreo del nivel del mar en tiempo real frente a eventos de tsunamis y otras amenazas naturales.

El desarrollo del proyecto GEORED –Red Nacional de Estaciones Geodésicas Satelitales GPS con propósitos geodinámicos de INGEO-MINAS– permitirá, a corto plazo, obtener mediciones instrumentales que sirvan para determinar las velocidades de desplazamientos relativos y, por consiguiente, la deformación de la corteza terrestre, y las variaciones del nivel del mar en las zonas costeras. Un aspecto importante que debe ser considerado para la ubicación de los mareógrafos es la necesidad de tener en cuenta las fuentes externas de movimiento en la superficie, como el retiro de fluidos (agua, gas, petróleo, etc.), y los movimientos tectónicos, los cuales pueden ser determinados con gran precisión mediante el uso de la tecnología GPS, en especial con estaciones permanentes

de este tipo, como las establecidas recientemente en Tumaco y Buenaventura.

Con la aplicación de la geodesia en geodinámica es posible dar una mirada en el ciclo sísmico antes, durante y entre sismos. Los datos GPS permiten establecer la tasa cuando se restringe el movimiento en el plano de falla y se presenta acumulación, y por tanto inferir el máximo posible de movimiento asociado a un futuro sismo. Si la falla es un límite de placa, la deformación intersísmica ocurre sobre una zona finita en la que los sitios a cada lado se mueven de forma relativa al interior de la placa donde están localizados. Al obtener datos geodésicos cerca de las fosas de subducción, puede identificarse la deformación intersísmica y dar claridad a los mecanismos de interfase de la subducción y los grandes sismos. Otra de las aplicaciones de la tecnología GPS se encuentra en el estudio de las variaciones en el contenido de electrones de la ionosfera, causadas por la propagación de ondas asociadas a la ocurrencia de tsunamis por terremotos. Esto, sumado a la determinación de desplazamientos súbitos del terreno asociados a sismos de fuente cercana o lejana, constituye una alternativa para la estimación

rápida de la magnitud real de los grandes terremotos y el mejoramiento en las capacidades de modelamiento de tsunamis en tiempo real.

Agradecimientos

Este estudio fue financiado por la Fundación para la Promoción de la Investigación y la Tecnología del Banco de la República, en el marco del proyecto Deltas de Colombia (Código 1519) y por el Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología Francisco José de Caldas, COLCIENCIAS, en el marco del proyecto Morfodinámica del delta del río Mira, costa Pacífica colombiana (Código 1216-05-17616). Los autores también agradecen a la Dirección General Marítima-Ministerio de Defensa Nacional por su cooperación a través de la interacción científica entre el Centro de Control de Contaminación del Pacífico, CCCP, y el Departamento de Geología de la Universidad EAFIT.

GEORED es un proyecto de investigación y desarrollo financiado por el Estado colombiano y ejecutado por INGEOMINAS a través de la Subdirección de Geología Básica de la Dirección Técnica del Servicio Geológico. ■

Referencias Bibliográficas

- Andrade, C. A. (2003). El cambio relativo del nivel del mar. En INVEMAR (Ed.). *Programa holandés de asistencia para estudios de cambio climático, Colombia: definición de la vulnerabilidad de los sistemas biogeofísicos y socioeconómicos debido a un cambio en el nivel del mar en las zonas costeras colombianas (Caribe y Pacífico) y medidas para su adaptación*. Informe final y Atlas digital. Informe Técnico 1, 62-77 [CD ROM].
- Andrade, C. A. (2008). Cambios recientes del nivel del mar en Colombia. En Restrepo, J. D. (Ed.). *Deltas de Colombia: morfodinámica y vulnerabilidad ante el cambio global*. Medellín: Universidad EAFIT.
- Aubrey, D. G., Emery, K. O. & Uchupi, E. (1988). Changing coastal levels of South America and the Caribbean region from tide-gauge records. *Tectonophysics*, 154, 269-284.
- Beck, S. L. & Ruff, L. J. (1984). The rupture process of the great 1979 Colombia earthquake: evidence for the asperity model. *J. Geophys. Res.*, 89, 9281-9291.
- Cediel, F., Shaw, R. P. & Cáceres, C. (2003). Tectonic assembly of the Northern Andean Block. En Bartolini, C., Buffler, R.T., Blickwede, J. (Eds.). *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics*. AAPG, *Memoir*, 79, 815-848.
- Collot, J. Y., Charvis, P. & Béthoux, N. (2003). *La campagne SISTEUR: Sismique réflexion et sismique réfraction sur la marge d'Équateur et de Colombie*. 6 Septembre-19 Octobre 2000. *Géosciences Azur*. Francia.
- Ericson, J. P., Vörösmarty, C. J., Dingman, S. L., Ward, L. G., Meybeck, M. (2006). Effective sea-level rise and deltas: causes of change and human dimension implications. *Global Planet. Change*, 50, 63-82.

- FitzGerald, D. M., Fenster, M. S., Argow, B. A. & Buynevich, I. V. (2008). Coastal impacts due to sea-level rise. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 36, 601-647.
- Franco, A. S. (1992). *Tides programs for prediction and analysis: manual*. São Paulo, Brazil.
- GLCF. (2007). *Landsat TM-1986 and ETM-2000 scenes of the Colombia-Ecuador coastal zone. Global Land Cover Facility, University of Maryland*. En <http://glcfapp.umiacs.umd.edu/index.shtml>.
- Gutscher, M. A., Malavieille, J., Lallemand, S. & Collot, J. Y. (1999). Tectonic segmentation of the North Andean margin: Impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 168, 255-270.
- Herd, D. G., Youd, T. L., Meyer, H., Arango, C. J. L., Person, W. J. & Mendoza, C. (1981). The great Tumaco, Colombia earthquake of 12 December 1979. *Science*, 211, 441-445.
- Hori, K. & Saito, Y. (2008). Classification, architecture, and evolution of large river deltas. En Gupta, A. (Ed.). *Large rivers: geomorphology and management*. New York: John Wiley & Sons.
- IDEAM. (2007). *Datos horarios del nivel relativo del mar para la estación mareográfica de Tumaco, 1953-2006, y datos horarios de caudal, 1981-2002, en la estación limnigráfica San Juan, río Mira*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. Formato digital.
- IGAC. (2007). Fotografías aéreas 1958 y 1993 del sector de desembocadura principal del río Mira, costa Pacífica colombiana, escala 1:40.000. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- INGEOMINAS. (2007). *Sismicidad registrada por la Red Sismológica Nacional de Colombia* (junio de 2003 a septiembre de 2007). Mapa del Pacífico sur colombiano. Bogotá: Instituto Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS.
- IPCC. (2007). *Climate change 2007: the physical science basis, summary for policy-makers*. Contrib. Work. Group I Fourth Assess. Rep. Intergov. Panel Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kanamori, H. & McNally, K. C. (1982). Variable rupture mode of the subduction zone along the Ecuador-Colombia coast. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 72, 1241-1253.
- Martínez, J. O., González, J. L., Pilkey, O. H. & Neal, W. J. (2000). Barrier island evolution on the subsiding central Pacific coast, Colombia, South America. *J. Coast. Res.*, 16, 663-674.
- Moore, G. F., Bangs, N. L., Taira, A., Kuramoto, S., Pangborn, E. & Tobin, H. J. (2007). Three-dimensional splay fault geometry and implications for tsunami generation. *Science*, 318, 1128-1131.
- Monroy, C. A., Restrepo, J. D., López, S. A. (2008). Morfodinámica del delta del río Mira. En: Restrepo, J. D. (Ed.) *Deltas de Colombia: morfodinámica y vulnerabilidad ante el cambio global*. Medellín: Universidad EAFIT.
- Morton, R. A., González, J. L., López, G. I., Correa, I. D. (2000). Frequent non-storm washover of barrier islands, Pacific coast of Colombia. *J. Coast. Res.*, 16, 82-87.
- Parker, G., Akamatsu, Y., Muto, T. & Dietrich, W. (2004, July). Modeling the effect of rising sea level on river deltas and long profiles of rivers. *Proceedings, International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICCEE)*. Japón.
- Pugh, D. (2004). *Changing sea levels: effects of tides, weather and climate*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Restrepo, J. D. (2008). Vulnerabilidad de los deltas ante el cambio global: contexto mundial y Colombia. En Restrepo, J. D. (Ed.). *Deltas de Colombia: morfodinámica y vulnerabilidad ante el cambio global*. Medellín: Universidad EAFIT.
- Restrepo, J. D., Kjerfve, B., Correa, I. D. & González, J. (2002). Morphodynamics of a high discharge tropical delta, San Juan River, Pacific coast of Colombia. *Marine Geol.* 192, 355-381.
- Restrepo, J. D. & López, S. A. (2008). Morfodinámica de los deltas de Colombia. En Restrepo, J. D. (Ed.) *Deltas de Colombia: morfodinámica y vulnerabilidad ante el cambio global*. Medellín: Universidad EAFIT.
- Restrepo, J. D., López, S. A. & Monroy, C. A. (2009). Natural dynamics of a pristine tropical delta, Mira River, Pacific coast of Colombia. *Global Planet. Change* (en prensa).
- Rodríguez-Rubio, E. & López, S. A. (2006, June). Sea-level rise differences on the Colombian Pacific ocean between tide gauges and altimetry data. Poster Session. Understanding Sea-level Rise and Variability. Paris.
- Savage, J. C. (1983). A dislocation model of strain accumulation and release at a subduction zone. *J. Geophys. Res.*, 88 (B6), 4984-4996.

- Stein, S. & Wysession, M. (2003). *An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure*. Malden, USA: Blackwell Publishing.
- Syvitski, J. P. M. (2008). Deltas at risk. *Sustain Sci.*, 3, 23-32.
- Syvitski, J. P. M. & Saito, Y. (2007). Morphodynamics of deltas under the influence of humans. *Global Planet. Change*, 57 (3), 261-282.
- Swenson, J. L. & Beck, S. L. (1996). Historical 1942 Ecuador and 1942 Peru subduction earthquakes and earthquake cycles along Colombia-Ecuador and Peru subduction segments. *PAGEOPH.*, 146, 67-101.
- Trenkamp, R., Kellogg, J. N., Freymueller, J. T. & Mora, H. (2002). Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *J. South Am. Earth Sci.*, 15, 157-171.
- UHSLC. (2005). Hourly 1951-2000 data from Tumaco tide-gauge, Colombia. The University of Hawaii Sea Level Center. Online database. <http://ilikai.soest.hawaii.edu/uhscl/datai.html>.
- White, S. M., Trenkamp, R. & Kellogg, J. N. (2003). Recent crustal deformation and the earthquake cycle along the Ecuador-Colombia subduction zone. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 216, 231-242.