

MODELOS MORFODINÁMICOS DE LOS DELTAS FLUVIALES COLOMBIANOS.

López, S.A.¹; Restrepo, J.D.¹

RESUMEN.

El presente estudio desarrolló una base de datos conformada por variables morfométricas, climáticas, hidrológicas y oceanográficas, con el fin de documentar los procesos que controlan la morfodinámica reciente de los deltas colombianos. Se plantearon algunas relaciones predictivas para expresar la variabilidad de diferentes parámetros morfométricos en términos de los procesos físicos dominantes, logrando resultados estadísticamente significativos. El área de los deltas depende de la magnitud de la descarga fluvial, lo que resalta la importancia de la producción de sedimentos en las cuencas de drenaje. El gradiente del plano deltaico depende de la extensión de la progradación de la costa y del poder marino. El número de canales está determinado por el poder fluvial. La amplitud promedio y total de los canales distributarios depende esencialmente de la actividad mareal. Los deltas colombianos constituyen ejemplos mundiales de sistemas escasamente documentados, los cuales han contrarrestado el alto potencial destructivo de procesos marinos y geológicos extremos mediante el aporte continuo de grandes cantidades de sedimentos al área litoral. Por esta razón, dichos deltas deberían ser incluidos en las bases de datos globales para ajustar los modelos morfodinámicos planteados hasta ahora para el conjunto de deltas modernos.

Palabras clave: Deltas colombianos; Morfodinámica; Procesos fluviales; Procesos marinos; Modelos estadísticos.

MORPHODYNAMIC MODELS OF THE COLOMBIAN RIVER DELTAS.

ABSTRACT.

A consistent database of morphometric, climatic, hydrologic and oceanographic parameters, was employed to construct morphodynamic models of the Colombian river deltas. Some predictive statistical relationships were obtained, all of them highly significant, and these associate morphometric variables to the main physical controls of the delta systems. The area of a delta depends of proxies of the river discharge, which emphasizes the high sediment yield in the drainage basins. The gradient of a delta plain depends on both the extent of the delta progradation, and the marine power. The number of distributaries crossing a delta depends on the fluvial power. Medium-and-total widths of distributary channels are directly related to the spring tidal range. Colombian deltas constitute world examples of scarcely-documented systems that oppose the extreme high-destructive marine and geological processes, by means of the continuous delivery of fluvial sediments to the coastal zone. Due to this, such deltas should be included to enhance the global databases, and fitting the current models developed to explain the morphodynamics of the world modern deltas.

Keywords: Colombian deltas; Morphodynamics; Fluvial processes; Marine processes; Statistical models.

INTRODUCCIÓN.

Se denominan deltas fluviales a los depósitos costeros, subaéreos y subacuados, que se originan a partir del suministro de sedimentos fluviales y de su interacción con la dinámica de los procesos marinos que inciden en la plataforma costera como el oleaje, las corrientes litorales y las mareas (Coleman, 1981). No obstante

las fuerzas fluviales y marinas son los primeros agentes de transporte y depositación de sedimentos (Galloway, 1975), la geometría interna de cada delta, su geomorfología subaérea y del perfil subacuado, y su evolución reciente, dependen de la interacción de condiciones límite como: (1) el suministro de sedimentos en suspensión y de fondo, reflejando las características de la cuenca de drenaje, la descarga fluvial y la producción

¹ Grupo de investigación Área Ciencias del Mar, Departamento de Geología, Universidad EAFIT. Apartado Aéreo 3300, Medellín, Colombia. slopezis@eafit.edu.co-jdrestre@eafit.edu.co

de sedimentos; (2) el espacio disponible de acomodación, controlado por las fluctuaciones del nivel del mar, la batimetría de la plataforma continental, la tectónica, la subsidencia, la compactación y la isostasia; (3) la energía costera, a través de la influencia del oleaje, la actividad mareal y el transporte litoral; y (4) las diferencias de densidad entre las aguas fluviales y marinas, críticas en la definición de la dinámica de las plumas de descarga del efluente (Wright & Coleman, 1973; Galloway, 1975; Coleman, 1981; Syvitski *et al.*, 2005; Syvitski & Saito, manuscrito en imprenta).

En los deltas modernos, la determinación de los controles físicos dominantes ha involucrado, además de análisis clásicos de morfología y morfometría (Wright & Coleman, 1973; Galloway, 1975), la cuantificación y comparación de indicadores morfodinámicos (Wright & Coleman, 1973; Orton & Reading, 1993; Hori *et al.*, 2002; Tanabe *et al.*, 2003; Syvitski & Saito, manuscrito en imprenta; Hori & Saito, manuscrito en imprenta) y la aplicación de métodos estadísticos multivariados que incluyen el amplio rango de condiciones climáticas, geológicas y topográficas de los deltas y sus sistemas fluviales a escala global (LOICZ, 1996; Syvitski, 2005; Syvitski & Milliman, manuscrito en revisión; Syvitski & Saito, manuscrito en imprenta). También, los enfoques más recientes de modelación numérica han prestado mayor atención a la cuantificación del efecto de las actividades humanas en los cambios del suministro de sedimentos desde las cuencas fluviales a la zona litoral, debidos a la disminución por retención en reservorios artificiales y a la pérdida de la escorrentía superficial por irrigación, o al aumento de los niveles de transporte de sedimentos por deforestación y cambios en el uso del suelo (Restrepo & Syvitski, 2006; Ericson *et al.*, 2006; Syvitski & Milliman, manuscrito en revisión). El objetivo de dichos modelos es estudiar la contribución relativa de los procesos de mayor importancia en la variabilidad morfológica de los sistemas, e inferir cómo la intervención antrópica presente y futura, continuará afectando el estado natural de la mayoría de los ríos y deltas (Syvitski & Saito, manuscrito en imprenta).

En Colombia, diversas investigaciones han aportado significativamente al conocimiento general de los procesos que influyen en las zonas deltaicas. Los principales enfoques de dichos estudios están enmarcados dentro de los aspectos: oceanográfico (Kjerfve,

1981; Pujos *et al.*, 1986; Javelaud, 1986; Aubrey *et al.*, 1988; Molina *et al.*, 1992; Chevillot *et al.*, 1993; Molina *et al.*, 1994; Restrepo & Kjerfve, 2002; Restrepo *et al.*, 2002; Morton *et al.*, 2002; INVEMAR, 2003a); geomorfológico (Verette, 1985; Molina *et al.*, 1992; Molina, 1993; Molina *et al.*, 1994; Bernal, 1996; Correa, 1996; Molina *et al.*, 1999; Restrepo *et al.*, 2002; Verette *et al.*, 2002; INVEMAR, 2003b); sedimentológico (Verette, 1985; Pujos *et al.*, 1986; Pujos & Javelaud, 1991; Molina & Mirmand, 1992; Molina, 1993; Chevillot *et al.*, 1993; Molina *et al.*, 1994; Bernal & Betancur, 1996; Molina *et al.*, 1999; INVEMAR, 2003b); y evolutivo (Correa, 1996; González *et al.*, 2002; Restrepo *et al.*, 2002; Serrano, 2004). Sin embargo, aún no se han desarrollado investigaciones dedicadas a documentar la importancia de las variables físicas en la morfodinámica reciente de los deltas colombianos. Por lo tanto, el presente artículo pretende describir bajo qué circunstancias dichos ambientes subsisten, teniendo en cuenta la cuantificación y relación entre variables físicas e indicadores numéricos.

ANTECEDENTES Y CONTEXTO GEOLÓGICO

Particularmente, la interacción compleja entre las placas Suramericana, Caribe, Nazca y la microplaca Costa Rica – Panamá en el noroccidente de Suramérica, concentra la mayor proporción de la deformación en el denominado Bloque Norandino. Esta zona presenta una variación sistemática del campo de esfuerzos en orientación y magnitud relativa de sur a norte (Colmenares & Zoback, 2003), y en ella ocurre una alta sismicidad ampliamente distribuida. La región colombiana, localizada en el núcleo de dicha dinámica tectónica, persiste en el levantamiento orogénico andino, contribuyendo a la elevación de montañas sobre los 3000 msnm y a la preservación de cuencas de drenaje de alto gradiente y fuerte control estructural. Estas cuencas se caracterizan además por el gran potencial denudativo de sus vertientes (Restrepo & Kjerfve, 2000; Restrepo & Restrepo, 2005) y el restringido desarrollo de áreas de acumulación de sedimentos, lo que permite que la mayor parte de la carga sedimentaria de varios sistemas fluviales importantes, sea entregada directamente a las zonas litorales del Pacífico y el Caribe para conformar deltas extensos (FIGURA 1).

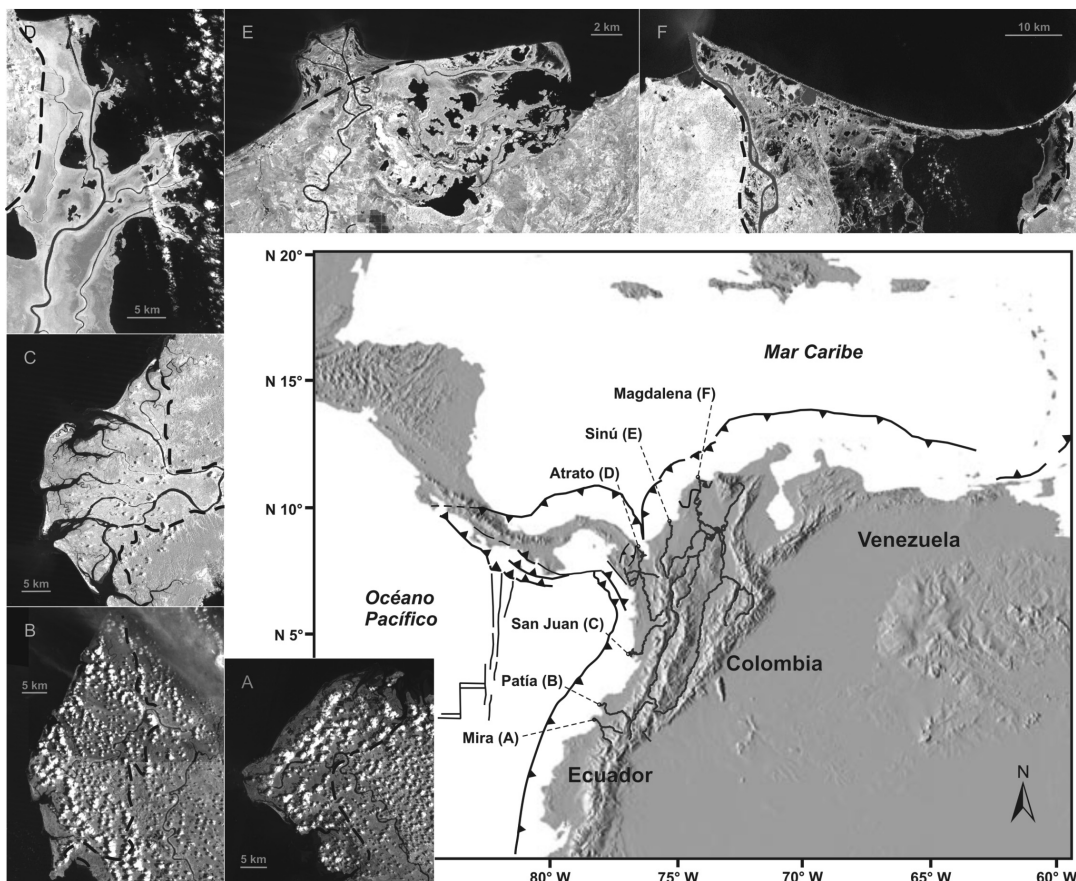


FIGURA 1. Localización de los deltas colombianos en los litorales Pacífico y Caribe.

En lo que concierne a la contribución fluvial de los ríos más importantes de los litorales Pacífico y Caribe de Colombia, Restrepo & Kjerfve (2000), calcularon una descarga fluvial total al Océano Pacífico de $254 \text{ km}^3 \text{ año}^{-1}$, y una tasa de transporte de sedimentos en suspensión de $96 \cdot 10^6 \text{ t año}^{-1}$ correspondiente a una producción de sedimentos de $1260 \text{ t km}^{-2} \text{ año}^{-1}$. Los dos ríos responsables de la mayor parte del aporte de sedimentos al litoral Pacífico de Colombia son el Patía y el San Juan, con aproximadamente el 40% de la carga total. Ambos ríos, junto con el Mira, actualmente exhiben importantes deltas subaéreos. Por otra parte y según el balance regional de aportes fluviales, los Andes colombianos suministran anualmente 338 km^3 de agua y $168 \cdot 10^6 \text{ t}$ de sedimentos en suspensión al litoral Caribe, de los cuales aproximadamente el 86% es contribución del río Magdalena, que representa una producción de sedimentos de $689 \text{ t km}^{-2} \text{ año}^{-1}$ (Restrepo & Restrepo, 2005), casi la mitad de la producción total de los ríos del Pacífico. Junto con

el Magdalena, los sistemas fluviales del Atrato y del Sinú, han desarrollado geformas deltaicas en sus desembocaduras al Mar Caribe.

Además de las altas descargas de agua y sedimentos a la zona costera, también se han reconocido importantes procesos tectónicos, oceanográficos y climáticos en la plataforma continental y las zonas marinas próximas a los deltas colombianos. En el litoral Pacífico, la estabilidad y evolución reciente de los deltas Mira, Patía y San Juan, está determinada en común por la presencia de fallas activas, responsables de una alta sismicidad superficial e intermedia, y de desplazamientos diferenciales de bloques tectónicos. Estos factores influyen en la ocurrencia de fenómenos de subsidencia cosísmica, en el desarrollo y la orientación de distributarios fluviales en el plano deltaico, y en la configuración batimétrica del sector del prodelta y la plataforma proximal, con formación de cañones submarinos por donde escapa parte de los aportes

sedimentarios continentales (Correa, 1996; Restrepo *et al.*, 2002). Sumado a lo anterior, la actividad de mareas semidiurnas con valores medios de altura entre 2 y 4 m y la presencia de olas de energía moderada en la línea de costa (Correa, 1996; González *et al.*, 2002; Restrepo *et al.*, 2002), son en general los agentes primarios de erosión y redistribución de los sedimentos. Otros factores como las tasas de cambio del nivel relativo del mar (Restrepo *et al.*, 2002; INVEMAR, 2003a; Restrepo & López, manuscrito en revisión), o las fluctuaciones con respecto al nivel del mar promedio debidas a condiciones oceanográficas extremas relacionadas con el fenómeno El Niño (ENOS) (Restrepo *et al.*, 2002), pueden tener una influencia notable en la estabilidad de las geoformas presentes en dichos ambientes (Morton *et al.*, 2002; Restrepo *et al.*, 2002; Restrepo & López, manuscrito en revisión).

La dinámica del litoral Caribe presenta marcadas diferencias con respecto al contexto de los procesos marinos del Pacífico. En primera instancia, las mareas en la zona costera del Caribe son de rango micromareal y tipo semidiurno a diurno (Kjerfve, 1981; Javelaud, 1986; Molina *et al.*, 1994; INVEMAR, 2003a), razón por la cual los deltas mayores de esta región, Atrato, Sinú y Magdalena, son sometidos a la interacción principal de las fuerzas fluviales y del oleaje. La influencia relativa de dichas fuerzas en el desarrollo deltaico, está limitada en primera instancia por los rasgos estructurales de la plataforma y el talud continental. Tales rasgos, que incluyen la presencia de diapiros de lodo, canales submarinos y bloques tectónicos segmentados a lo largo de una plataforma de amplitudes variables, controlan la configuración física local de las cuencas receptoras y el grado de influencia dinámica en la redistribución de sedimentos por parte de las olas, la deriva litoral y las corrientes marinas (Vernette, 1985; Javelaud, 1986; Pujos & Javelaud, 1991; Chevillot *et al.*, 1993; Molina, 1993; Molina *et al.*, 1994; Bernal, 1996; Bernal & Betancur, 1996).

METODOLOGÍA

Restrepo & López (manuscrito en revisión) proporcionaron una base de datos inicial del conjunto de variables que controlan la morfodinámica reciente de los deltas de Colombia, sintetizadas de diversas institu-

ciones e investigaciones locales, y de análisis propios. Este trabajo actualizó y complementó esa base de datos con otros índices morfométricos, hidrológicos y del poder marino, de acuerdo con los indicadores y variables propuestas por Syvitski (2005) y Syvitski y Saito (manuscrito en imprenta). La matriz final (TABLA 1) incluye: área de la cuenca fluvial (A), longitud del río (L_r), relieve máximo de la cuenca (R), amplitud máxima del río antes de entrar al delta (R_w), área subaérea del delta (A_D), gradiente del plano deltaico (D_{grad}), número de canales distributarios (C_N), amplitud total (TC_w) y promedio (C_w) de los canales distributarios en la desembocadura, longitud de la línea de costa (L_c), amplitud del delta (A_m), profundidad de la plataforma continental alcanzada por el delta subacuoso (D_{sh}), precipitación anual total (P), precipitación máxima mensual (P_{max}), temperatura promedio anual (T°), valores promedio y máximo del caudal (Q_{av} , Q_{max}), transporte de sedimentos (Q_s), altura promedio del oleaje en aguas abiertas (H_0), altura máxima mensual de las olas (W_a), poder del oleaje promedio (W_p), rango mareal promedio (T_r) y rango mareal "Spring" (T_i). También se consideraron los siguientes indicadores numéricos: producción de sedimentos ($Y=Q_s/A$), escorrentía superficial ($R_{cf}=Q_{av}/A$), poder fluvial ($P_r=11Q_{av}D_{grad}$), poder marino ($P_m=W_a^2+T_i^2$), poder marino contra poder fluvial ($P_m:P_r$), relación de atenuación del oleaje ($A_p=(W_{p\ 10m\ profundidad}/W_{p\ costa})K_r^2$, siendo K_r el coeficiente de refracción cerca de la costa), amplitud total de los distributarios contra amplitud máxima del río ($TC_w:R_w$), e índice de crenulación de la costa (L_c/A_m).

Teniendo en cuenta las diferencias en escala numérica y magnitud de los procesos físicos considerados en el análisis, las variables fueron escaladas y ponderadas mediante el procedimiento de estandarización. El análisis fue realizado con ayuda de los paquetes *SAS 8.0* y *STATGRAPHICS Plus 4.0*, aplicando las metodologías de regresión por etapas (*stepwise*) y de regresión máxima. Ambos procedimientos seleccionaron el conjunto más eficiente para explicar la varianza de la variable dependiente, pero se diferenciaron entre sí porque el primero usó un nivel de confianza umbral con el estimador $p<0.15$ para la introducción de variables, mientras el segundo determinó el mejor modelo posible sin importar dicho umbral.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de la matriz de correlación de Pearson permitió establecer los siguientes subconjuntos de variables con alto grado de asociación (Correlación lineal $(R) \geq 0.9$): (1) El caudal promedio, la descarga máxima mensual, el transporte de sedimentos, la longitud del río y el área de drenaje; (2) la altura máxima mensual de las olas y el poder promedio del oleaje;

(3) El rango marea spring y el rango marea promedio; (4) la amplitud total de los canales distributarios y la relación numérica entre ésta y la amplitud máxima del río; (5) el área subaérea del delta, su amplitud y el índice de crenulación de la costa; y (6) el poder marino y el índice expresado por la relación entre el poder marino y el poder fluvial. Con el fin de evitar colinealidad y por lo tanto sobreestimación en los modelos, de las variables mencionadas se seleccionaron como más

TABLA 1. Variables físicas e indicadores morfodinámicos de los deltas colombianos.

VARIABLES	Costa Pacífica			Costa Caribe		
	Mira	Patía	San Juan	Atrato	Sinú	Magdalena
Morfométricas						
<i>Sistema fluvial</i>						
A – área de la cuenca fluvial (km ²)	9530	23 700	16 470	35 700	14 700	257 440
L_r – longitud del río (km)	317	415	352	750	300	1540
R – relieve máximo de la cuenca (m)	4939	4580	3900	3150	3350	3685
R_w – amplitud máxima del río antes de entrar al delta (m)	400	600	400	500	120	600
<i>Plano deltaico</i>						
A_D – área subaérea del delta (km ²)	520	820	800	672	26	1690
D_{grad} – gradiente del plano deltaico (*10 ⁻⁵ m m ⁻¹)	53.3	43.5	13.8	3.07	20.4	7.66
C_w – número de canales distributarios (-)	8	6	5	7	3	7
C_w^p – amplitud promedio de los canales distributarios (m)	521	1500	2240	117	267	510
TC_w – amplitud total (acumulada) de los canales distributarios (m)	3650	9000	11 200	820	800	510
L_c – longitud de la línea de costa (km)	50	62	51	112	17	77
A_m – amplitud del delta (km)	34	57	40	42	11	67
D_{sh} – profundidad del prodelta (m)	30	38	82	31	10	78
Climáticas						
P – precipitación anual total (mm año ⁻¹)	3809	2595	7277	4944	1750	2050
P_{max} – valor máximo de precipitación (mm mes ⁻¹)	545	474	790	862	211	343
T° – temperatura promedio anual (°C)	24	24	23.1	24.7	28	23.7
Hidrológicas						
Q_{av} – caudal promedio (m ³ s ⁻¹)	871	1291	2550	2740	373	7160
Q – caudal del mes máximo (m ³ s ⁻¹)	3270	3082	5000	3060	586	10 287
Q_s^{max} – descarga de sedimentos en suspensión (*10 ⁶ t año ⁻¹)	9.77	21.1	16.4	11.26	4.2	144
Oceanográficas						
H_0 – altura promedio y dirección del oleaje “swells” en aguas abiertas (m)	1.4 [SW]	1.4 [SW]	1.4 [SW]	1.6 [N-NE]	2.1 [NE]	2.3 [NE]
W_a – altura máxima mensual de las olas, calculada en la costa (m)	0.36	0.24	0.23	0.17	0.12	2.7
W_p – poder del oleaje promedio (erg s ⁻¹ m)	132 003	55 493	38 366	13 370	7336	34 859 818
T_r – rango marea promedio (m)	2.6	2.6	3	0.15	0.18	0.62
S_T – rango marea en “spring tides” (m)	3	3	3.4	0.24	0.28	0.64
Indicadores numéricos						
Y – producción de sedimentos (t km ⁻² año ⁻¹)	1025	972	1150	315	589	689
R_{cf} – escorrentía superficial (mm año ⁻¹)	2872	1718	4884	2420	800	953
P_f – poder fluvial (-)	5.09	6.18	3.87	0.93	0.84	6.09
P_m – poder marino (-)	9.13	9.06	11.61	0.09	0.09	7.7
$P_m:P_f$ – poder marino contra poder fluvial (-)	1.79	1.47	3	0.09	0.11	1.26
A_p – relación de atenuación del oleaje (-)	2056.27	4830.79	6382.78	23 124.12	83 425.65	77
$TC_w:R_w$ – amplitud total de los distributarios contra amplitud máxima del río (-)	9.12	15	28	1.64	6.67	0.85
L/A_m – índice de crenulación de la costa (-)	1.47	1.09	1.27	2.67	1.55	1.15

representativas la descarga fluvial, el poder del oleaje, la amplitud total de los canales distributarios, el área del delta y el poder marino.

Al examinar la base de datos ambientales, se encontró que el área de los deltas de Colombia (A_D) está mejor expresada ($R^2=0.96, p<0.01$) por la descarga promedio (Q_{av}) y la amplitud máxima del río antes de entrar al delta (R_w) (TABLA 2). Ambos parámetros reflejan la importancia de la producción de sedimentos en las cuencas fluviales de los Andes colombianos (Restrepo & Kjerfve, 2000; Restrepo & Restrepo, 2005), favoreciendo la preservación de los sistemas deltaicos en contra de la oposición de condiciones oceanográficas extremas (Restrepo & López, manuscrito en revisión) y las limitaciones del espacio disponible de acomodación, dada su ubicación en plataformas continentales irregulares, de extensión variable y segmentadas en bloques estructurales escalonados con movimientos diferenciales activos (Vernette, 1985; Correa, 1996).

Syvitski & Saito (manuscrito en imprenta) hallaron una relación similar para el área deltaica, empleando variables físicas de 51 deltas que cubren un amplio rango de características morfométricas, hidrológicas, climáticas, geográficas y oceanográficas, incluyendo al Magdalena como único sistema colombiano. Además de la descarga de agua y sedimentos, estos autores encontraron que el otro control limitante del crecimiento de los deltas es la profundidad alcanzada por el prodelta (D_{sh}). La modificación en el espacio de acomodación, dada por la progradación y los cambios en el nivel relativo del mar, entre otros factores, pueden hacer insuficiente el aporte de sedimentos para continuar el crecimiento deltaico, moviendo el balance de los procesos hacia el dominio marino destructivo (Parker *et al.*, 2004).

Tanto la escorrentía superficial, como la elevación máxima y el área de las cuencas fluviales, ejercen un control primario en la predicción de la descarga de

TABLA 2. Modelos morfodinámicos de los deltas colombianos, expresando las variables morfométricas en función de diferentes indicadores del poder fluvial y marino, y del espacio disponible de acomodación. El significado de cada variable está enunciado en el texto.

Ecuación de regresión	R ² Modelo	F	p
$A_D = -4.52E^{-11} + 0.68^{85\%} Q_{av} + 0.41^{11\%} R_w$ (Método de regresión por etapas. Mejor modelo de 2 variables con $p<0.15$)	0.96	40.82	<0.01
$D_{grd} = -1.67E^{-10} - 1.21D_{Sh} + 1.24P_m$ (Método de regresión máxima. Mejor modelo de 2 variables)	0.97	47.65	<0.01
$C_N = 1.19E^{-10} + 0.71^{51\%} R_w$ (Método de regresión por etapas. Único modelo de 1 variable con $p<0.15$)	0.51	4.11	0.11
$C_w = 9.25E^{-18} + 0.80^{64\%} T_i$ (Método de regresión por etapas. Único modelo de 1 variable con $p<0.15$)	0.64	7.02	0.06
$TC_w = -1.85E^{-17} + 0.88^{77\%} T_i$ (Método de regresión por etapas. Único modelo de 1 variable con $p<0.15$)	0.77	13.32	0.02

sedimentos a la zona litoral (Syvitski & Milliman, manuscrito en revisión). Al graficar los valores del área de drenaje contra el área deltaica, y compararlos con los sistemas más importantes del mundo, puede observarse que los deltas de Colombia siguen la tendencia general, y sus dimensiones se encuentran dentro del rango de variación global (del orden de $>10^2$ - 10^5 km²) (FIGURA 2), no obstante sus cuencas de drenaje llegan a ser hasta de un orden de magnitud menor en extensión (10^4 km²) con respecto a la situación mundial (10^5 - 10^7 km²). Estas diferencias en tamaño de las cuencas resaltan la influencia primaria de la escurrimiento (R_{cf} entre 0.8 y <3 m año⁻¹; TABLA 1) y la altura máxima de los sistemas fluviales colombianos ($R > 3000$ m) (ambos parámetros considerados índices de las condiciones climáticas y tectónicas locales, respectivamente) en los altos valores de producción de sedimentos (Restrepo & Restrepo, 2005; Restrepo & Syvitski, 2006). También, otros deltas tropicales suramericanos (Orinoco, Amazonas) y asiáticos (Ganges-Brahmaputra, Irrawaddy, Mekong, Yangtze, Yellow) sobresalen en los mayores aportes de sedimentos fluviales, favorecidos por el relieve abrupto derivado de los movimientos activos de la corteza terrestre, y

por las precipitaciones intensas en las áreas fuente (Hori & Saito, manuscrito en imprenta).

Por otra parte, el gradiente del plano deltaico (D_{grd}) en los sistemas colombianos fue mejor expresado ($R^2=0.97$, $p<0.01$) por la profundidad de la plataforma continental alcanzada por el delta subacuoso (D_{sh}), y por el poder marino (P_m). Teóricamente, la profundidad del prodelta es un indicador de la progradación alcanzada por la línea de costa, proceso que influye en la disminución del gradiente del plano subaéreo y también en la generación de canales distributarios; mientras que el poder marino incide en el frente deltaico, modificando y suavizando el contorno costero mediante la redistribución de sedimentos, e impidiendo la progradación, lo que favorece un alto gradiente del delta (Bates, 1953; Wright & Coleman, 1973; Syvitski & Saito, manuscrito en imprenta). No obstante, al estudiar separadamente la contribución parcial de cada variable en el modelo lineal, se encontró que ninguna superaba el 20% de la varianza explicada, y además, no arrojaron relaciones significativas con $p < 0.15$. Esto quiere decir que aunque dichas variables han sido reconocidas en la literatura como controles

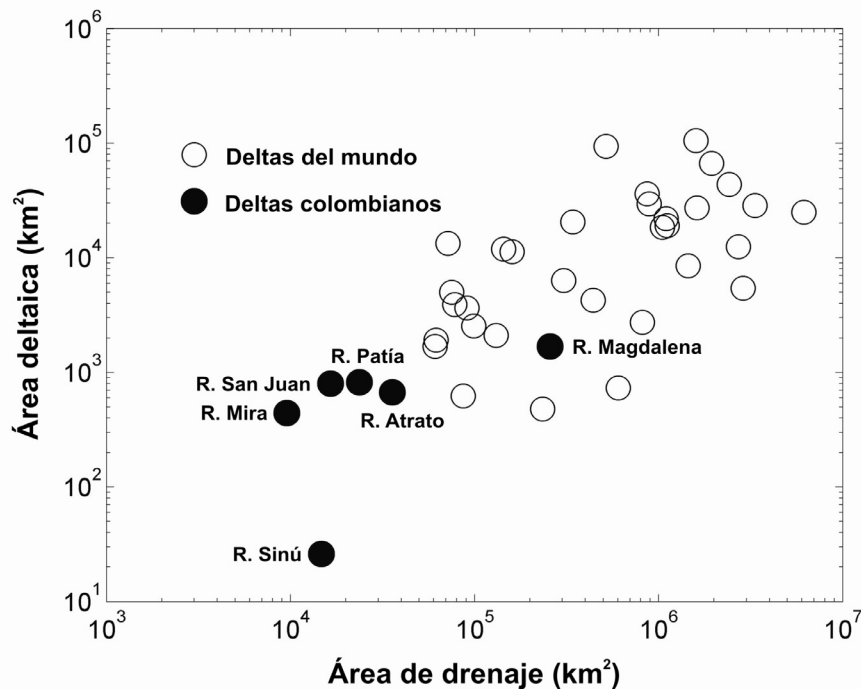


FIGURA 2. Área deltaica (km²) y área de drenaje (km²) para los deltas colombianos y los deltas más importantes del mundo. Los valores globales fueron tomados de Coleman (1981), Orton & Reading (1993) y Syvitski & Saito (manuscrito en imprenta).

primarios de la morfometría deltaica, y juntas conforman un modelo estadísticamente significativo para explicar el contexto colombiano, otros factores no incluidos en la matriz de datos pueden estar ejerciendo control adicional. Probablemente, el mecanismo más importante en la variabilidad del gradiente del plano deltaico es la tectónica local, dado que, en los deltas del Pacífico (Mira, Patía y San Juan), la ocurrencia de basculamientos de bloques ha determinado la orientación y migración de los sistemas principales de descarga durante su evolución reciente, y a su vez ha modificado la batimetría de la plataforma costera, afectando puntualmente la incidencia de las olas y la actividad mareal (Correa, 1996). Para Syvitski & Saito (manuscrito en imprenta), el gradiente del plano deltaico en el contexto global es función de la relación entre indicadores del suministro de sedimentos y su retención en el delta, y la profundidad del prodelta.

El número de canales distributarios (C_N) fue mejor expresado ($R^2=0.51$, $p=0.11$) por la amplitud máxima

del río antes de entrar al delta (R_w), lo que sugiere el control fluvial esperado en los deltas colombianos. Sin embargo, casi la mitad de la varianza en el número de canales permanece sin explicar. De nuevo, puede considerarse la influencia tectónica en el desarrollo de los distributarios en los deltas del Pacífico, ya que los levantamientos diferenciales en sus depocentros han propiciado migraciones de los sectores de descarga más activos (Correa, 1996). En contraste, a partir del espectro global de deltas, Syvitski & Saito (manuscrito en imprenta) encontraron una mejor relación del número de canales distributarios con el caudal máximo y el poder marino.

La amplitud promedio (C_w) y total (TC_w) de los canales distributarios, fue mejor expresada ($R^2=0.64$, $p=0.06$ y $R^2=0.77$, $p=0.02$, respectivamente) por el rango mareal *Spring* (T_s). Claramente, las diferencias del tipo mareal entre los litorales Pacífico y Caribe de Colombia (FIGURA 3), son las responsables de la variabilidad en estos dos parámetros morfométricos,

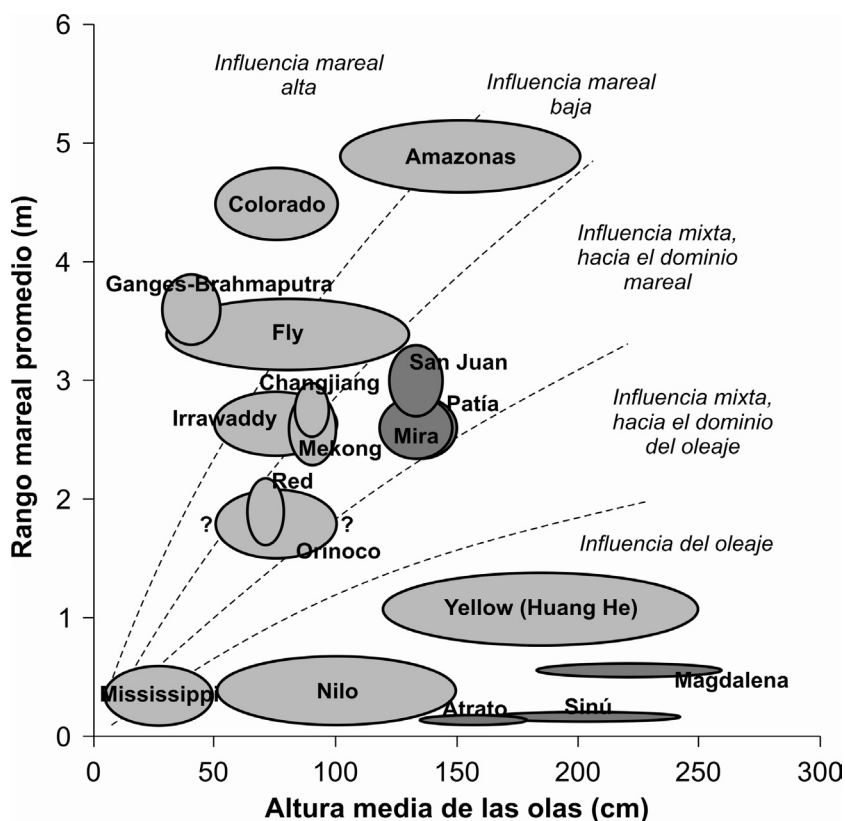


FIGURA 3. Rango mareal promedio (m) y altura media de las olas (cm) para los deltas colombianos y los deltas más importantes del mundo. Las sub-zonas hacen referencia a cinco clases morfológicas diferentes según el proceso marino dominante. Modificado de Hori *et al.* (2002).

ya que las condiciones mesomareales del Pacífico son propicias para el desarrollo de desembocaduras en forma de trompeta. Sin embargo, queda un porcentaje de variación no explicado en el modelo, el cual puede corresponder al oleaje incidente (con la deriva litoral asociada), y a la dinámica fluvial. Para Syvitski (2005) y Syvitski & Saito (manuscrito en imprenta), la amplitud promedio y total de los distributarios en el espectro global de deltas, depende de las fuerzas fluviales, mareales y del oleaje.

SÍNTESIS

El presente estudio desarrolló una base de datos conformada por variables e indicadores morfométricos, climáticos, hidrológicos y oceanográficos, para documentar los procesos físicos que controlan la morfodinámica reciente de los deltas fluviales colombianos. A partir de dicha información, se plantearon algunas relaciones predictivas con el fin de expresar la variabilidad de diferentes parámetros morfométricos en términos de los procesos físicos dominantes, logrando para el contexto colombiano resultados estadísticamente significativos, y acordes con los conceptos teóricos actuales y las relaciones numéricas establecidas para el conjunto global de deltas modernos.

Los modelos encontrados en este trabajo pueden ser utilizados como base para estimar la respuesta morfológica de los sistemas ante cambios naturales o antrópicos de las fuerzas fluviales y marinas. El tamaño de los deltas colombianos depende de la magnitud de la descarga fluvial, lo que resalta la importancia de la producción de sedimentos en las áreas de drenaje. El gradiente del plano deltaico depende de la extensión de la progradación de la costa y el poder marino. El número de canales también está determinado por el poder fluvial. La amplitud promedio y total de los canales distributarios depende esencialmente de la actividad mareal, aunque la dinámica fluvial y del oleaje pueden ejercer un control adicional.

Los deltas colombianos constituyen ejemplos mundiales de sistemas escasamente documentados, los cuales han podido contrarrestar el alto potencial destructivo de procesos marinos y geológicos extremos, a través del aporte continuo de grandes cantidades de

sedimentos al Océano Pacífico y al Mar Caribe. Dada esta combinación única de procesos físicos operantes, dichos sistemas deberían ser incluidos en las bases de datos globales para ajustar los modelos morfodinámicos planteados hasta ahora para el conjunto de deltas modernos.

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”, y por el Instituto Nacional para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología, COLCIENCIAS, en el marco del proyecto “Morfodinámica del delta del río Mira, costa Pacífica colombiana”. Los autores también agradecen a la Dirección General Marítima-Ministerio de Defensa Nacional, por su cooperación a través de la interacción científica entre el CCCP (Centro de Control de Contaminación del Pacífico) y el Departamento de Geología de la Universidad EAFIT.

REFERENCIAS

- 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, pp. 269-284.
- Bates, C.C. (1953). Rational theory of delta formation. *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.* 37 (9), pp. 2119-2162.
- Bernal, G. (1996). Caracterización geomorfológica de la llanura deltaica del río Magdalena con énfasis en el sistema lagunar de la Ciénaga Grande de Santa Marta. *Boletín INVEMAR* 25, pp. 19-48.
- Bernal, G. y Betancur, J. (1996). Sedimentología de lagunas costeras: Ciénaga Grande de Santa Marta y Ciénaga de Pajarales. *Boletín INVEMAR* 25, pp. 49-76.
- Chevillot, P., Molina, A., Giraldo, L., Molina, C. (1993). Estudio geológico e hidrológico del golfo de Urabá. *Boletín Científico CIOH* 14, pp. 79-89.
- Coleman, J.M. (1981). (Ed.) *Deltas: processes of deposition and models for exploration*. 2 Ed. Burgess Publishing Company, 124 p.
- Colmenares, L., Zoback, M.D. (2003). Stress field and seismotectonics of northern South America. *Geology* 31, pp. 721-724.
- Correa, I.D. (1996). *Le littoral Pacifique colombien: interdependance des agents morphostructuraux et hydrodynamiques*. Ph. D. These-Geologie Marine. Université Bordeaux I, 178 -p.

- 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 and Planetary Change* 50, pp. 63-82.
- Galloway, W.E. (1975). Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems. En: Broussard, M. L. (Ed.) *Deltas, models for exploration*. Houston Geological Society, pp. 87-98.
- González, J.L., Correa, I.D., Aristizábal, O. (2002). Evidencias de subsidencia cosísmica en el delta del San Juan. En: Correa, I. D., Restrepo, J.D. (Eds.) *Geología y oceanografía del delta del río San Juan: litoral Pacífico colombiano*. Fondo Editorial Universidad EAFIT, pp. 89-110.
- Hori, K., Saito, Y., manuscrito en imprenta. Classification, architecture, and evolution of large river deltas. En: Gupta, A. (Ed.) *Large rivers: geomorphology and management*. John Wiley & Sons (2005).
- Hori, K., Saito, Y., Zhao, Q., Wang, P. (2002). Architecture and evolution of the tide-dominated Changjiang (Yanktze) river delta, China. *Sedimentary Geology* 146, pp. 249-264.
- INVEMAR, 2003a. El cambio relativo del nivel del mar. En: Programa holandés de asistencia para estudios de cambio climático, Colombia: definición de la vulnerabilidad de los sistemas bio-geofísicos 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].
- INVEMAR, 2003b. Atlas digital ANM Colombia. En: Programa holandés de asistencia para estudios de cambio climático, Colombia: definición de la vulnerabilidad de los sistemas bio-geofísicos 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. [CD ROM].
- Javelaud, O. (1986). Sedimentología de la plataforma continental del Caribe colombiano. *Boletín Científico CIOH* 6, pp. 17-39.
- Kjerfve, B. (1981). Tides of the Caribbean sea. *Journal of Geophysical Research* 86, pp. 4243-4247.
- LOICZ, (1996). Report of the LOICZ workshop on statistical analysis of the coastal lowlands data base (typology). *Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone (LOICZ)*, LOICZ Meeting Report 18, August 1996, The Netherlands.
- Molina, A. (1993). Estudio sedimentológico y morfológico de la plataforma continental Caribe entre el sector de Santa Marta y Punta Morro Hermoso. *Boletín Científico CIOH* 14, pp. 67-77.
- Molina, A., Mirmand, M.L. (1992). Estudio sedimentológico de la plataforma continental norpacífica colombiana (bahía de Buenaventura-frontera con Panamá). *Boletín Científico CIOH* 10, pp. 27-36.
- Molina, A., Molina, C., Chevillot, P. (1992). La percepción remota aplicada para determinar la circulación de las aguas superficiales del golfo de Urabá y las variaciones de su línea de costa. *Boletín Científico CIOH* 11, pp. 43-58.
- Molina, A., Molina, C., Giraldo, L., Barrera, R. (1999). Características estratigráficas y morfodinámicas de la franja litoral Caribe colombiana (sector Barranquilla (Bocas de Ceniza)-flecha de Galerazamba). *Boletín INVEMAR* 28, pp. 61-94.
- Molina, A., Molina, C., Giraldo, L., Parra, C., Chevillot, P. (1994). Dinámica marina y sus efectos sobre la geomorfología del golfo de Morrosquillo. *Boletín Científico CIOH* 15, pp. 93-113.
- Morton, R.A., González, J.L., Correa, I.D., Salazar, O., Tabares, N., López, G.I. (2002). Causas y efectos de eventos atípicos de sobrelavado en la costa Pacífica de Colombia – los eventos de sobrelavado de Mayo a Agosto de 1997 en la isla El Choncho, delta del río San Juan. En: Correa, I.D., Restrepo, J.D. (Eds.) *Geología y oceanografía del delta del río San Juan: Litoral Pacífico colombiano*. Fondo Editorial Universidad EAFIT, 131-148 p.
- Orton, G.J., Reading, H.G. (1993). Variability of deltaic processes in terms of sediment supply, with particular emphasis on grain size. *Sedimentology* 40, pp. 475-512.
- Parker, G., Akamatsu, Y., Muto, T., Dietrich, W. (2004). Modeling the effect of rising sea level on river deltas and long profiles of rivers. *Proceedings, International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICCEE)*, July 2004, Japan.
- Pujos, M., Javelaud, O. (1991). Depositional facies of a mud shelf between the Sinú river and the Darien gulf (Caribbean coast of Colombia): environmental factors that control its sedimentation and origin of deposits. *Continental Shelf Research* 11 (7), pp. 601-623.
- Pujos, M., Pagliardini, J.L., Steer, R., Vernet, G., Weber, O. (1986). Influencia de la contracorriente norte colombiana para la circulación de las aguas en la plataforma continental: su acción sobre la dispersión de los efluentes en suspensión del río Magdalena. *Boletín Científico CIOH* 6, pp. 3-15.
- Restrepo, J.D., Kjerfve, B. (2000). Water discharge and sediment load from the western slopes of the Colombian Andes with focus on Rio San Juan. *The Journal of Geology* 108, pp. 17-33.
- Restrepo, J.D., Kjerfve, B. (2002). The San Juan delta, Colombia: tides, circulations, and salt dispersion. *Continental Shelf Research* 22, pp. 1249-1267.
- 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 Geology* 192, pp. 355-381.
- Restrepo, J.D., López, S.A. (2007). Manuscrito en revisión. Morphodynamics of the Pacific and Caribbean deltas of Colombia, South America. *Journal of South American Earth Sciences*.
- Restrepo, J.C., Restrepo, J.D. (2005). Efectos naturales y antrópicos en la producción de sedimentos de la cuenca del río Magdalena. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 29, pp. 239-254.
- Restrepo, J.D., Syvitski, J.P.M. (2006). Assessing the effect of natural controls and land use change on sediment yield in a major Andean river: the Magdalena drainage basin, Colombia. *Ambio* 35 (2), pp. 65-74.

Serrano, B. (2004). The Sinú river delta on the northwestern Caribbean coast of Colombia: Bay infilling associated with delta development. *Journal of South American Earth Sciences* 16, pp. 639-647.

Syvitski, J.P.M. (2005). The morphodynamics of deltas and their distributary channels. (En PDF). Disponible en: <http://www.criba.edu.ar/scorwg122/reports/RCEMpaper.pdf>

Syvitski, J.P.M., Kettner, A.J., Correggiari, A., Nelson, B. (2005). Distributary channels and their impact on sediment dispersal. *Marine Geology* 222-223, pp. 75-94.

Syvitski, J.P.M., Milliman, J.D. (2006). Manuscrito en revisión. Geography, geography and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean. *The Journal of Geology*.

Syvitski, J.P.M., Saito, Y. (2007). Manuscrito en imprenta. Morphodynamics of deltas under the influence of humans. *Global and Planetary Change*, doi: 10.1016/j.gloplacha.2006.12.001.

Tanabe, S., Ta, T.K.O., Nguyen, V.L., Tateishi, M., Kobayashi, I., Saito, T. (2003). Delta evolution model inferred from the Holocene Mekong delta, southern Vietnam. En: Sidi, F.H., Nummedal, D., Imbert, P., Darman, H., Posamentier, H.W. (Eds.) *Tropical deltas of southeast Asia: sedimentology, stratigraphy, and petroleum geology*. SEPM Special Publication 76, pp. 175-188.

Vernette, G. (1985). La plate-forme continentale caraibe de colombie (du débouché du Magdalena au golfe de Morrosquillo): importante du diapirisme argileux sur la morphologie et la sedimentation. Ph. D. These-Docteur ès Sciences. Université Bordeaux I, 381p.

Vernette, G., Gayet, J., Echeverry, C.M., Piedrahita, I., Correa, I.D. (2002). Introducción a los ambientes deltaicos: morfología y sedimentación. En: Correa, I.D. y Restrepo, J.D. (Eds.) *Geología y oceanografía del delta del río San Juan: litoral Pacífico colombiano*. Fondo Editorial Universidad EAFIT, pp. 22-53.

Wright, L.D., Coleman, J.M. (1973). Variations in morphology of major river deltas as functions of ocean wave and river discharge regimes. *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.* 57 (2), pp. 370-398.

Trabajo recibido: febrero 22 de 2007

Trabajo aceptado: mayo 26 de 2007