

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE LAS QUEBRADAS DEL PARQUE NACIONAL NATURAL GORGONA, PACÍFICO COLOMBIANO

STREAM PHYSICO-CHEMISTRY AT GORGONA ISLAND NATURAL NATIONAL PARK,
TROPICAL EASTERN PACIFIC

Juan F. Blanco

Resumen

En Colombia son escasos los estudios biogeoquímicos en quebradas naturales. Por esa razón se midieron varios parámetros físico-químicos y las concentraciones de carbono orgánico disuelto, nitrógeno total, fósforo total, cloruros y sulfatos para aproximarnos al papel de procesos geológicos, atmosféricos y biológicos en las quebradas de la Isla Gorgona en periodos de baja y alta precipitación durante 2008. Las aguas superficiales son prístinas por los bajos contenidos de nitrógeno. La litología volcánica, predominantemente basáltica e intrusiva ultramáfica, posiblemente determina la ocurrencia de aguas salinas (conductividad > 500 μ Mhos/cm), neutro-alcalinas (pH < 8,5) y ricas en fósforo total (< 200 μ g/l). Los aerosoles marinos son los posibles responsables de una alta concentración de cloruros (> 2 mg/l). La concentración de carbono orgánico disuelto fue mayor en bosques maduros (> 60 mg/l) que en secundarios y rastrojos (< 60 mg/l). La baja concentración de sulfatos sugiere que no hay aportes atmosféricos desde fuentes industriales o volcánicas, aunque existen emisiones submarinas de gases en La Azufrada. El disturbio hidrológico alteró la concentración de los elementos dependiendo de su naturaleza y de las características de las cuencas.

Palabras clave: carbono orgánico disuelto, cloruros, crecientes, fosfatos, Isla Gorgona, parámetros físico-químicos

Abstract

Biogeochemical studies in Colombian streams are scarce, for this reason I measured several physico-chemical variables, along with total dissolved organic carbon, total nitrogen, total phosphorous, chloride and sulfur to determine the influence of geologic, atmospheric and biotic processes during low and high rainfall periods. Volcanic lithology (basalts and ultramafic intrusives) is seemly responsible for the occurrence of saline (conductivity > 500 μ mhos/cm), neutro-alkaline (pH < 8,5) and phosphorus-rich (< 200 μ g/l) waters. Marine aerosols are possibly responsible for chloride inputs (> 2 mg/l). The dissolved organic carbon was higher in mature forest (> 60 mg/l) than in secondary forests and shrublands (< 60 mg/l). The low concentration of sulfates suggests that industrial and volcanic gas emissions do not exist, although underwater gas-bubbling is noticeable at La Azufrada reef. Increased rainfall and discharge altered element concentrations depending on their nature and basin features.

Key words: chloride, dissolved organic carbon, Gorgona Island, hydrologic disturbance, phosphate, physico-chemistry

INTRODUCCIÓN

El estudio de las características físicas y químicas de las aguas de los ríos y quebradas

ha sido útil para entender el papel de los procesos biológicos, geológicos y atmosféricos en los ciclos biogeoquímicos de las cuencas hidrográficas (McClain et al. 1998). Aunque

Recibido: mayo 2009; aceptado: noviembre 2009.

Docente. Instituto de Biología, Universidad de Antioquia. A. A. 1226. Medellín (Antioquia), Colombia. Correos electrónicos: <jfblanco73@yahoo.com>, <blanco@matematicas.udea.edu.co>

estos estudios florecieron en las zonas templadas después de los trabajos pioneros en las cuencas experimentales en Hubbard Brook durante los años sesentas y setentas (ver Allan 1995), en el neotrópico no sólo hay un menor número de estudios sino que éstos se concentran en Costa Rica (revisado por Triska et al. 2006), Puerto Rico (e.g., McDowell et al. 1995, McDowell y Asbury 1994, Schaefer et al. 2000) y más recientemente en Panamá (e.g., Condit et al. 2001) y el Amazonas peruano (McClain y Naiman 2008). Poco se conoce sobre las características físico-químicas de las quebradas de las Antillas menores (Harrison y Rankin 1976, McDowell 1991, McDowell et al. 1995) y particularmente de las islas del Pacífico oriental (Vásquez et al. 1996) que presentan orígenes geológicos y edades diferentes a las de los sitios más estudiados. Sin embargo, la poca información disponible para el neotrópico indica que dichas propiedades son influenciadas estrechamente por la geología, el tipo de cobertura vegetal y de suelo, la hidrología, procesos atmosféricos y actividades humanas, tal como se ha documentado ampliamente en las zonas templadas (McClain et al. 1998). Por ejemplo, el tipo de iones y nutrientes, la conductividad y el pH dependen estrechamente de la geología de las cuencas, particularmente cuando las quebradas son alimentadas por manantiales geotermales en zonas volcánicas activas como es el caso de Costa Rica (Pringle y Triska 1991, Pringle et al. 1990). Por otra parte, la cobertura vegetal, especialmente en la zona ribereña, afecta el ciclo de elementos como el nitrógeno (McDowell 2001, McDowell et al. 1996). La hidrología, influenciada por la alternancia de sequías y lluvias torrenciales (Triska et al. 2006) o por el paso de tormentas tropicales y huracanes (Schaefer et al. 2000), también altera la concentración y flujo de nutrientes. Finalmente, procesos atmosféricos

como el transporte de aerosoles (Cavelier et al. 1997, Eklund et al. 1997, Heartsill-Scalley et al. 2007, McDowell et al. 1990) o la emisión de partículas a la atmósfera desde fuentes terrestres (Heartsill-Scalley et al. 2007, Matson et al. 1999, Stallard 2000) también introducen iones particulares (e.g., Ca, Cl, K, Mg, SO₄) a las quebradas neotropicales.

Para avanzar en el entendimiento de los ciclos biogeoquímicos en las cuencas hidrográficas tropicales es necesario ubicar sitios cuasi prístinos alejados de emisiones antropogénicas a la atmósfera (tal como se ha hecho en Norte y Sur América), debido a que se ha demostrado que dichas fuentes alteran la composición química (e.g., NH₄, NO₃, SO₄) de las aguas de las quebradas naturales (Hedin et al. 1995, Lewis et al. 1999, Perakis y Hedin 2002). Estudios en dichos sitios prístinos o de referencia han permitido acoplar las concentraciones y flujos de elementos a procesos a la escala de la cuenca a través del ciclo hidrológico superficial. La Isla Gorgona, ubicada en la parte sur de la costa Pacífica colombiana, ofrece ventajas para estudiar las características físico-químicas de las aguas en condiciones cuasi-naturales, porque se encuentra alejada de centros urbanos que puedan generar grandes emisiones atmosféricas, y su cobertura vegetal no se encuentra actualmente alterada. A lo largo de los 1.300 km de la costa Pacífica colombiana solo hay cuatro centros urbanos pequeños donde la industria pesquera y el comercio son las principales actividades, que no parecen responsables por emisiones significativas de gases a la atmósfera. La Isla Gorgona se encuentra a 52 km al frente de la costa de Guapi, y a más de 150 km al sur de Buenaventura y al norte de Tumaco. Por otra parte, la actividad antrópica en la Isla ha estado presuntamente limitada a un sector de la vertiente oriental a lo largo de su historia y desde 1984

es un parque nacional natural (Díaz et al. 2001, UAESPNN-DTSO 2005). La geología de la isla también ha sido muy estudiada (considerada “de culto” entre los petrólogos) porque en ella se encuentran las komatiitas más jóvenes del mundo, únicas que datan del Fanerozoico (90 millones de años) (Kerr 2005). También existen varios estudios climatológicos de la isla (aprovechando la presencia de una estación instalada en 1986) y de la región pacífica (ver Blanco 2009a en este número). Por lo tanto, la información disponible sobre la geología, la climatología y los bosques de isla proveen una buena base para los estudios biogeoquímicos de la isla.

El objetivo de este trabajo es describir las principales características físico-químicas de las quebradas de la Isla Gorgona e interpretarlas desde una perspectiva biogeoquímica más que desde una de calidad de aguas (según los usos históricos y actuales se conoce que no hay vertimientos ni puntuales ni difusos de aguas residuales domésticas). Particularmente, el interés es establecer: **a)** si hay indicios de influencia geológica y atmosférica importante sobre las características de las quebradas y **b)** cómo estas características cambian con respecto al disturbio hidrológico durante la época de lluvias. Adicionalmente, este trabajo busca estimular estudios futuros diseñados para avanzar nuestro conocimiento de la biogeoquímica de quebradas insulares y tropicales en general.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. La Isla Gorgona está ubicada a 35 km de Punta Reyes al occidente del municipio de Guapi ubicado en la parte sur de la costa pacífica colombiana (2° 47' - 3° 06' N, 78° 06' - 78° 18' O; ver figura 1 en Blanco et al. 2009, en este número). Se considera una

isla continental de origen volcánico submarino (Kerr 2005) pero aunque hay acuerdo en cuanto a su composición geológica, su sitio de origen es controvertido. Recientemente, Kerr (2005) propuso que la isla se originó en los ca. 26°S durante el Eoceno (hace 88-89 millones de años) y es parte de una placa oceánica diferente a la Placa Oceánica del Caribe (> 90 millones de años), contrario a lo que proponen hipótesis previas. Por otro lado, a medida que se aplican nuevas técnicas de datación, paleomagnetismo y geoquímica, pierde más fuerza la hipótesis de la conexión entre la isla Gorgona y la Serranía del Baudó (Gansser 1950).

El 80% de la superficie de la Isla Gorgona está constituida por rocas ígneas en una serie estratigráfica que comprende Peridotitas basales, sobre las cuales se hallan los gabros que están cubiertos por lavas basálticas con flujos de komatiíta. Por encima de estos flujos se presenta toba ultramáfica y, a continuación, las rocas sedimentarias del terciario y los depósitos cuaternarios, especialmente las formaciones de playa y los deslizamientos. La edad más probable de la lava ultramáfica es mesozoica (Kerr 2005, Llinás et al. 1990). Adicionalmente, se conoce la composición química de los diferentes tipos de rocas (Llinás et al. 1990), lo cual podría ayudar a inferir la influencia que ella tiene en las características químicas de las aguas de las quebradas. Los estudios disponibles indican que las aguas de las quebradas son claras, muy oxigenadas (saturación > 80%), neutro-alcalinas (pH: 7,0-8,0), semiduras (dureza: 33-70 mg CaCO₃/l) y pobres en nitrógeno (NH₄ < 0,15 mg/l) (Calá 1990, Vásquez et al. 1996).

El clima de la isla es superhúmedo tropical marítimo debido a que la temperatura del aire y la humedad son altas (26 °C y 90%, respectivamente) durante todo el año. La distribución de la lluvia a lo largo del año es

monomodal y totaliza 6.661 mm/año, mientras que la evaporación totaliza solamente 900 mm/año (ver Blanco 2009a en este número). La menor precipitación se produce entre diciembre y abril mientras que la mayor se presenta entre mayo y noviembre. Este balance hídrico positivo mantiene más de 25 quebradas permanentes de primer a tercer orden, entre las cuales las cinco más grandes poseen caudales que varían entre 30 y 300 l/s. La variabilidad de precipitación y de caudal es controlada por la Zona de Convergencia Intertropical y por la Oscilación Sureña (Blanco 2009a en este número).

Debido a la alta pluviosidad, la isla está cubierta en su mayoría por bosques lluviosos tropicales y bosques de niebla, aunque en las áreas de influencia de la antigua prisión ("El Poblado": 3 ha) dominan rastrojos bajos y bosques secundarios donde abundan las especies de árboles exóticos como producto del legado de la tala rasa y del establecimiento de cultivos (UAESPNN-DTO 2005, ver Valencia-G. et al. 2009 en este número). La isla presenta un rango de elevación entre 0 y 330 m sobre el nivel del mar y cerca del 90% de la isla tiene laderas muy inclinadas (50-75%) rodeadas por pendientes bajas (< 12%).

Muestreo. Este estudio es exploratorio, por ello se midieron algunos parámetros físico-químicos del agua in situ y se analizaron otros en el laboratorio: carbono orgánico, nitrógeno total, fósforo total, hierro total, cloruros y sulfatos. Los muestreos se realizaron en abril 2-9 y junio 4-10 de 2008, lo que correspondió a las épocas de menor y mayor precipitación, respectivamente (Gómez-Aguirre et al. 2009, en este número). En ambos periodos se visitaron siete quebradas en la vertiente oriental y dos en la occidental, y en cada una de éstas se muestreó un tramo bajo (10-25 msnm). Acceso

a tramos altos fue limitado por la corta longitud de algunas quebradas, dificultades de acceso impuestas por los deslizamientos de tierra y el largo tiempo de los recorridos a pie por la costa (limitado en algunos casos por el régimen de mareas) dado que no existen trochas o senderos abiertos. Por ello, solo en las quebradas Pizarro, Ilú, El Roble y La Camaronera se seleccionó adicionalmente un tramo alto (35-50 msnm). En dos puntos separados 10 m en cada tramo, se midieron la intensidad lumínica (usando un luxómetro EXTECH 401025), la temperatura del aire (usando un termistor), la temperatura del agua, la concentración y saturación de oxígeno disuelto y la conductividad eléctrica (usando una sonda multiparamétrica YSI® 85), el pH (usando un peachímetro de bolsillo Hanna Instruments® HI 98130), la concentración de dióxido de carbono (por medio de titulación con NaOH), la alcalinidad (por medio de titulación con H₂SO₄). Siguiendo el método estándar descrito por Gordon et al. (2004), en cada tramo se estimó el caudal por medio de la medición del área de la sección transversal, la pendiente, la rugosidad del lecho y la medición de la velocidad promedio del agua (usando un flujómetro Global Water Flow Probe®). En el tramo bajo también se recolectó una muestra de 1000 ml de agua que fue refrigerada y transportada para su análisis en el Laboratorio del Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares de la Universidad de Antioquia. Se analizaron carbono orgánico disuelto (por medio de oxidación siguiendo la Norma Técnica Colombiana-NTC- 5167), fósforo total (P₂O₅, por medio de fotometría, NTC 234) y cloruros (por medio de electroforesis capilar). También se midieron nitrógeno total (por medio de Kjeldahl, NTC 370) y hierro (por medio de absorción atómica, SM3111B). También se midieron los sulfatos (por medio de la titulación con BaCl₂) pero sólo durante abril

debido a problemas del laboratorio proveedor del servicio.

Análisis estadísticos. El tamaño máximo de muestra por variable medida *in situ* fue 24 (4 medidas en 3 quebradas y 2 medidas en 6 quebradas). Tamaños menores se obtuvieron por mal funcionamiento de los instrumentos. En primer lugar, los parámetros físico-químicos medidos *in situ* se compararon entre periodos de muestreo por medio de una prueba pareada (*signed*) no-paramétrica de Wilcoxon (Zar 1999), dado que el diseño de muestreo fue de medición repetida en el mismo tramo en dos periodos de tiempo. En segundo lugar, para la comparación espacial, los valores de características físico-químicas fueron promediados dentro de cada quebrada antes de realizar la prueba de Wilcoxon. La misma prueba se repitió con las variables químicas medidas en el laboratorio y el caudal (para las cuales solo existió un valor por quebrada por fecha). Algunos elementos químicos no se midieron en todas las fechas o quebradas debido a daños de los equipos de laboratorio. Debido a lo anterior, no fue posible realizar un análisis de ordenación para clasificar las quebradas con base en múltiples elementos y parámetros físico-químicos, y se utilizó un método univariado.

Para explorar la influencia de la variación del caudal sobre las concentraciones de dichas variables se realizaron análisis cualitativos de tendencias dentro de cada periodo. Aunque no se midió la concentración de carbono inorgánico o total, se utilizó la fracción orgánica para calcular la proporción C:P como un estimativo de limitación por fósforo. Finalmente, se calculó la exportación bruta (mg/s) de carbono orgánico disuelto y fósforo multiplicando la concentración por el caudal con el fin de estimar el aporte de cada quebrada a la zona costera y discutir su efecto sobre las formaciones

coralinas. No se pudo obtener la exportación neta (kg/ha día) porque las cuencas de la isla no están delimitadas.

RESULTADOS

La precipitación mensual durante abril de 2008 (317 mm) estuvo por debajo del promedio histórico (430 mm) mientras que durante junio (1.086 mm) estuvo por encima (848 mm). Debido a que las quebradas de la isla Gorgona son de pequeño orden, sus aguas son relativamente frías (< 25 °C) debido a la baja irradianza aun durante la época de menor precipitación. La temperatura disminuyó significativamente (8,8%) entre abril y junio, mientras que el oxígeno disuelto aumentó, y el pH y la alcalinidad disminuyeron (figura 1). La conductividad eléctrica no presentó diferencias significativas. Las aguas pueden definirse como bien oxigenadas (saturación > 80%), neutro-alcalinas (rango 7,0-8,5) y con una conductividad relativamente alta para aguas dulces naturales (rango: 500-2000 $\mu\text{Mhos/cm}$; nótese que 1 $\mu\text{Mhos/cm}$ = 1 $\mu\text{S/cm}$). El caudal varió significativamente entre quebradas y aumentó consistentemente en todas durante junio por el incremento de la precipitación (excepto en el Chorro del Cura que permaneció constante, figura 2). En El Roble no fue posible estimar el caudal en junio debido a que se creció repentinamente.

Los parámetros físico-químicos mencionados anteriormente también variaron entre las quebradas (figura 2). El pH fue consistentemente menor en El Roble durante ambos muestreos (< 7,6). La alcalinidad carbonácea fue < 100 mg/l en Pizarro, Iguapoga, Ilú y El Roble durante abril. La conductividad fue > 1000 $\mu\text{Mhos/cm}$ en El Muelle, Aeropuerto, La Camaronera y Cocal Norte, y notablemente baja en Ilú y El Roble durante abril.

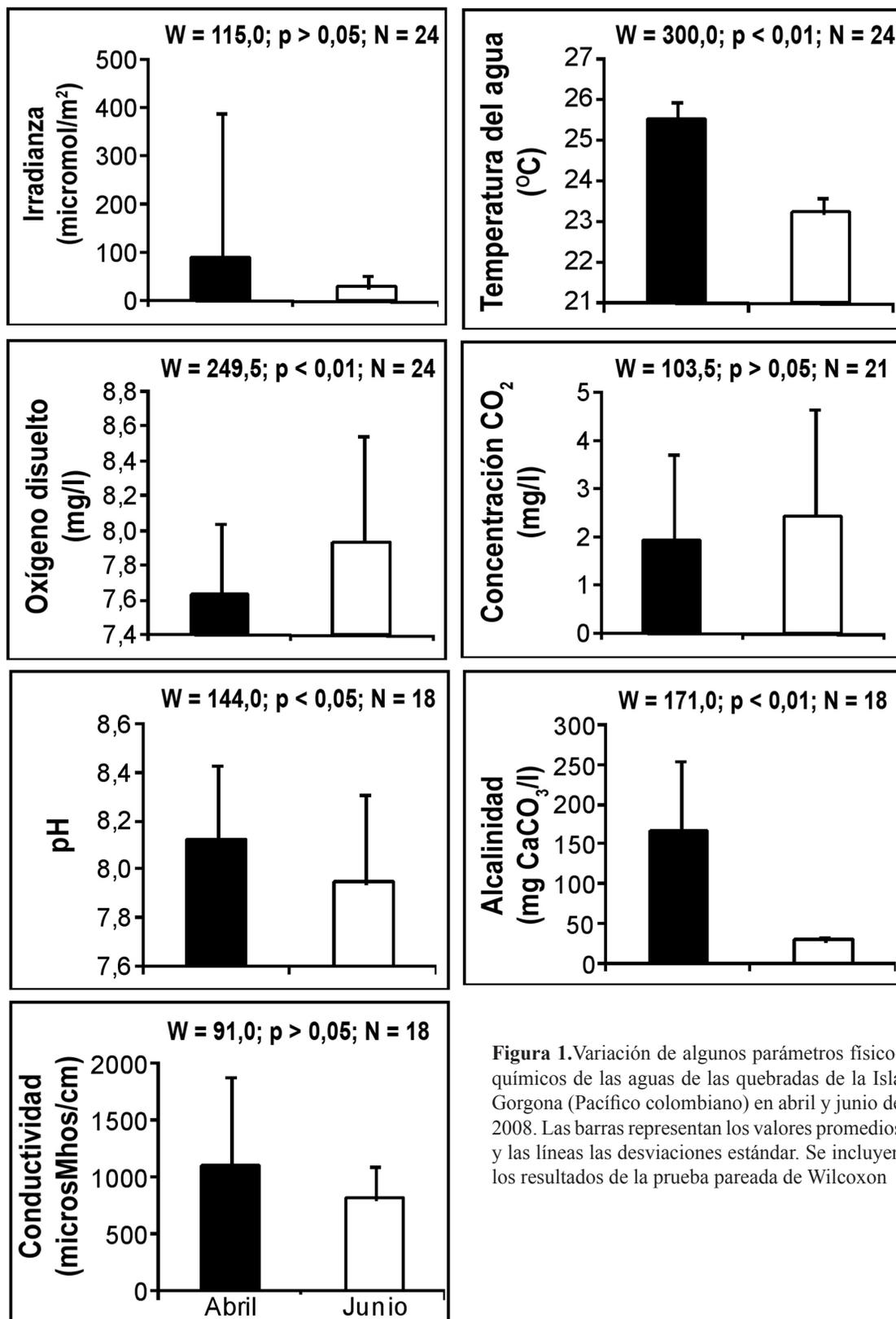


Figura 1. Variación de algunos parámetros físico-químicos de las aguas de las quebradas de la Isla Gorgona (Pacífico colombiano) en abril y junio de 2008. Las barras representan los valores promedios y las líneas las desviaciones estándar. Se incluyen los resultados de la prueba pareada de Wilcoxon

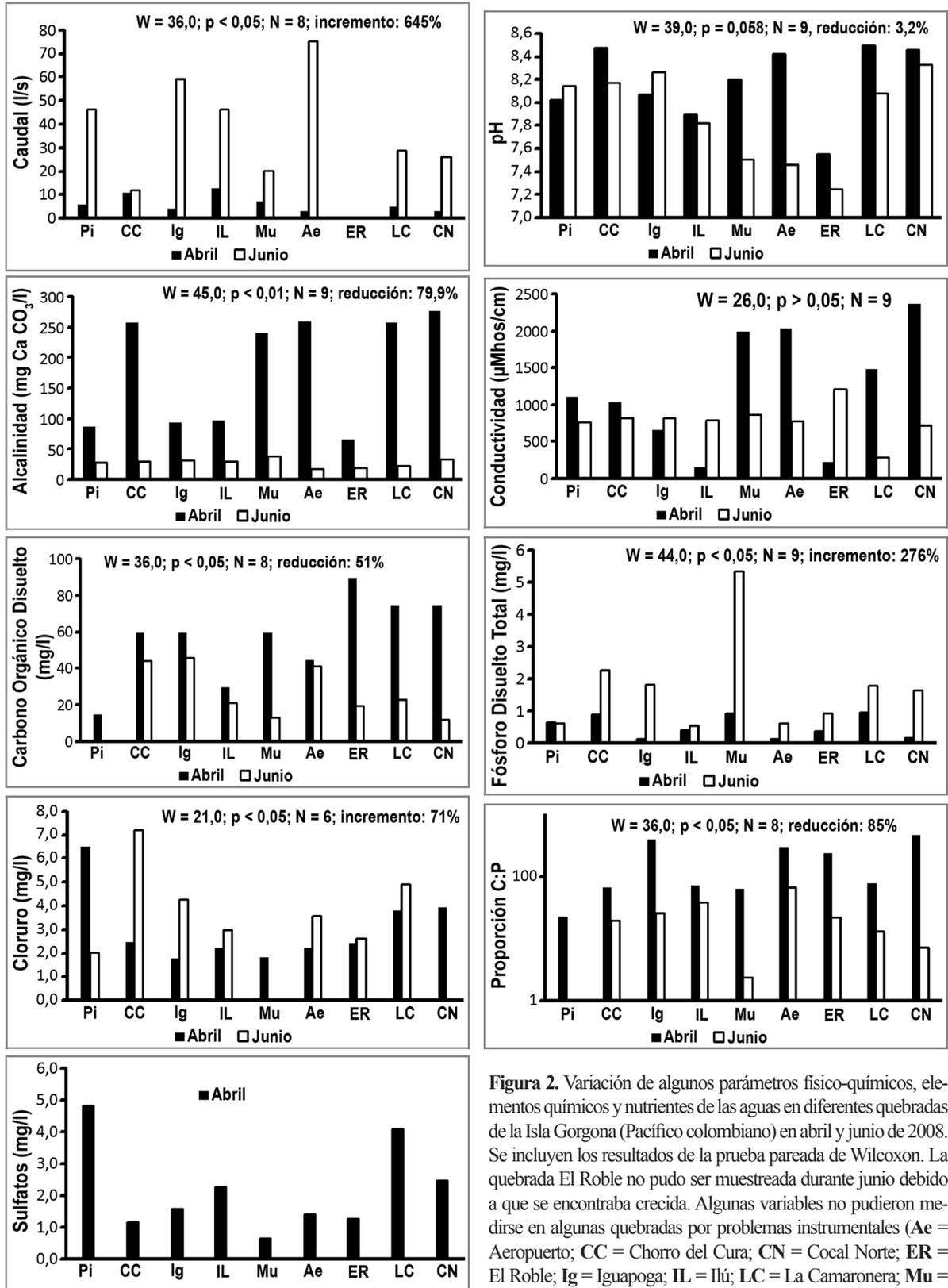


Figura 2. Variación de algunos parámetros físico-químicos, elementos químicos y nutrientes de las aguas en diferentes quebradas de la Isla Gorgona (Pacífico colombiano) en abril y junio de 2008. Se incluyen los resultados de la prueba pareada de Wilcoxon. La quebrada El Roble no pudo ser muestreada durante junio debido a que se encontraba crecida. Algunas variables no pudieron medirse en algunas quebradas por problemas instrumentales (Ae = Aeropuerto; CC = Chorro del Cura; CN = Cocal Norte; ER = El Roble; Ig = Iguapoga; IL = Ilú; LC = La Camaronera; Mu = Muelle; Pi = Pizarro)

El carbono orgánico disuelto disminuyó significativamente en junio, mientras que el fósforo disuelto total aumentó (figura 2). La proporción C:P también disminuyó durante junio, pero en ambas épocas fue menor que el valor estoiquiométrico de Redfield 106, excepto en Iguapoga, Aeropuerto, El Roble y Cocal Norte durante el mes de abril. Los cloruros aumentaron significativamente durante junio (excepto en Pizarro que presentó el patrón opuesto). Los sulfatos solamente se pudieron medir durante abril y presentaron una mayor concentración en Pizarro y La Camaronera (> 4 mg/l) (figura 2). Finalmente, las concentraciones de nitrógeno total y de hierro fueron inferiores al límite de detección de los métodos empleados (< 10 mg/l y < 0,039 ppm, respectivamente).

Especialmente, el análisis exploratorio mostró que el carbono y los cloruros estaban relacionados con el caudal (figura 3). En abril, el carbono fue menor en aquellas quebradas con mayor caudal (e.g., Ilú) y mayor en aquellas con menor caudal (El Roble, Cocal Norte, La Camaronera). En junio se obtuvo una relación positiva luego de excluir al Chorro del Cura (que presentó una concentración alta a pesar de su bajo caudal). Iguapoga y Aeropuerto, las quebradas con mayor caudal, presentaron las concentraciones mayores, mientras que El Muelle, Cocal Norte y La Camaronera presentaron menor concentración. La concentración de cloruros no mostró relación con el caudal en abril, pero en junio presentó una tendencia negativa, siendo mayores las concentraciones en El Chorro del Cura y La Camaronera (figura 3). El fósforo no se relacionó con el caudal durante abril o junio, aunque en este segundo mes fue mayor en El Muelle, El Chorro del Cura, Cocal Norte y La Camaronera, y menor en Aeropuerto, Ilú y Pizarro (figura 3).

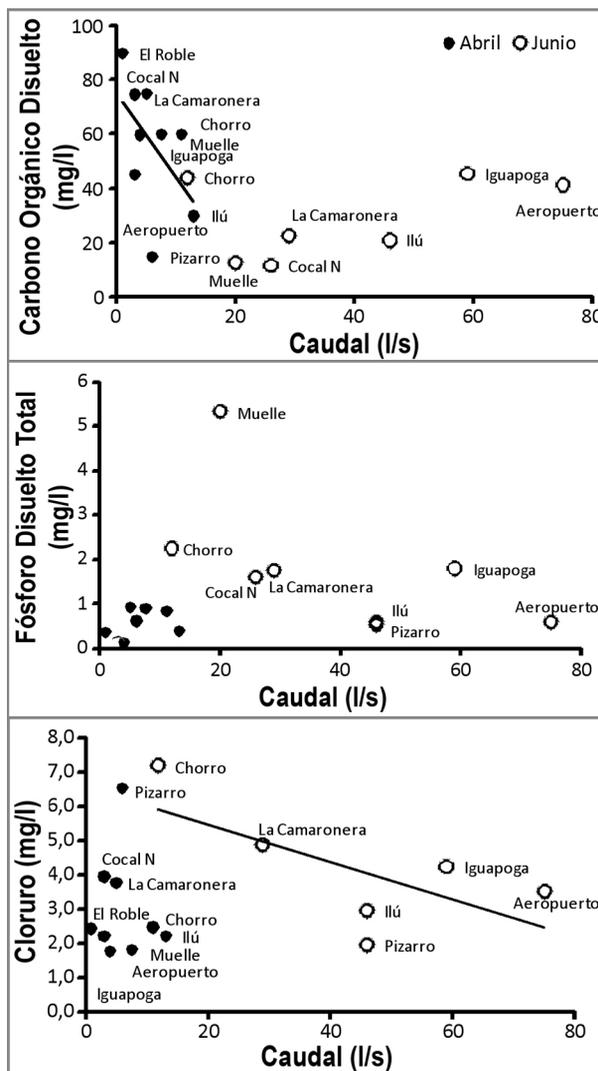


Figura 3. Relación entre el carbono orgánico disuelto, fósforo total disuelto y cloruro con el caudal en diferentes quebradas de la Isla Gorgona (Pacífico colombiano) en abril y junio de 2008

La estimación de flujo bruto de carbono orgánico y fósforo total al mar mostró un claro patrón espacial (tabla 1). En términos de carbono, Aeropuerto, Iguapoga, Ilú y El Muelle exportaron más que Pizarro y El Roble (vertiente oriental) y La Camaronera y Cocal Norte (vertiente occidental). Con respecto al fósforo, Iguapoga y El Muelle exportaron más que Pizarro, La Camaronera y Cocal Norte.

Tabla 1. Caudales, concentraciones y flujos de carbono orgánico disuelto y fósforo total en varias quebradas de la Isla Gorgona (Pacífico colombiano) en abril y junio de 2008

Quebrada	Caudal (l/s)		Carbono orgánico disuelto				Fósforo total			
	abril	junio	abril	junio	abril	junio	abril	junio	abril	junio
			(mg/l)	(mg/l)	(mg/s)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/s)	(mg/s)
Pizarro	6	46	14,9	-	89,4	-	0,6	0,6	3,9	28,1
Chorro	11	12	59,8	44,2	657,8	530,4	0,9	2,3	9,6	27,1
Iguapoga	4	59	59,7	45,5	238,8	2684,5	0,1	1,8	0,6	106,8
Ilú	13	46	29,9	21,0	388,7	966,0	0,4	0,6	5,3	25,8
Muelle	8	20	59,9	12,9	454,0	258,0	0,9	5,3	7,1	106,4
Aeropuerto	3	75	44,9	41,4	134,7	3105,0	0,1	0,6	0,4	46,5
Roble	1	-	89,6	19,7	89,6	-	0,4	0,9	0,4	-
Camaronera	5	29	74,9	22,8	374,5	661,2	1,0	1,8	4,8	51,3
Cocal Norte	3	26	74,5	11,9	223,5	309,4	0,2	1,6	0,5	42,4

DISCUSIÓN

Características generales. Las aguas de las quebradas de la Isla Gorgona pueden considerarse limpias desde el punto de vista sanitario debido a que poseen altas concentraciones y saturaciones de oxígeno disuelto y bajas concentraciones de gas carbónico disuelto (rango 0-7,7 mg/l) como producto de la fuerte pendiente de los cauces y la rápida exportación de la materia orgánica fragmentada (datos sin publicar). Esto además se confirma por la claridad de las aguas (en todos los casos fue posible observar el lecho aún a > 1 m de profundidad) y el buen estado microbiológico (Valencia-G. y Lizarazo-M. 2009). Estos resultados coinciden con los obtenidos por Vásquez et al. (1996) quienes concluyeron que los valores detectados para las variables analizadas (ácidez total, dureza total, calcio, nitrógeno y turbiedad) se encontraban dentro de los rangos normales para el desarrollo óptimo de la biota acuática en varias quebradas de la isla. De hecho en nuestro estudio la concentración de nitrógeno total estuvo por debajo del límite de detección del método de Kjeldahl (< 10 mg/l). Esto coincide con lo obtenido por Hedin et al. (1995), Lewis et al. (1999) y Perakis y Hedin (2002)

quienes plantean que las concentraciones de nitrógeno total son muy bajas (< 200 µg/l) en quebradas prístinas de Sur y Norte América, y que la principal fracción es la orgánica disuelta, mientras que en la fracción inorgánica, la proporción nitrato:amonio es <1. De acuerdo a Heartsill-Scalley et al. (2007) el bajo contenido de nitrógeno en el agua de lluvia refleja el aislamiento de las cuencas atmosféricas. Posiblemente, en la Isla Gorgona la concentración de nitrógeno está cerca a lo observado en dichas quebradas prístinas, de acuerdo a datos existentes de concentración de amonio (rango: 50-150 µg/l; Vásquez et al. 1996). Estos valores de amonio también son inferiores a los observados en aguas contaminadas y naturales observadas en sitios muy estudiados como la isla de Puerto Rico (< 4 mg/l; Blanco y Scatena 2006) y el piedemonte de los Andes Venezolanos (< 15 mg/l; Allan et al. 2006). También se encuentran en el orden de magnitud de quebradas prístinas de algunas Antillas Menores (rango: 16-144 µg NH₄-N/l; McDowell 1991, McDowell et al. 1995).

Posibles influencias sobre la físico-química de las aguas. Aunque el presente estudio es puntual

en tiempo y espacio, se presenta aquí un marco teórico amplio para estimular que investigadores posteriores desarrollen hipótesis específicas sobre los controles de la biogeoquímica de Isla Gorgona. El origen volcánico de la isla y su clima superhúmedo marítimo probablemente promueven las características neutro-alcalinas y con relativamente alta conductividad de las aguas como se reportó previamente (Calá 1990, Vásquez et al. 1996). Se conoce que la disolución de las rocas basálticas y los aerosoles aportan iones a las quebradas costeras volcánicas. Particularmente, el aporte de Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} y Cl^- contribuyen al aumento de la conductividad eléctrica y la salinidad iónica (Wetzel 2001). De acuerdo a la química de las rocas volcánicas de la Isla Gorgona, los basaltos (rocas predominantes en las quebradas) están compuestos en un alto porcentaje por SiO_2 (50%), Al_2O_3 (14%), CaO (11%), FeO (12%), MgO (7%) y otros en menor porcentaje (< 6%: Na_2O y K_2O) (Echeverría y Aitken 1986), cristales disolubles cuya disociación iónica podría contribuir al incremento de la conductividad de las aguas. En este estudio la conductividad promedio excedió $500 \mu\text{Mhos/cm}$ ($=\mu\text{S/cm}$), y según la teoría 60-70% de este valor corresponde a sales disueltas totales. De hecho observamos que la salinidad tuvo valores medibles (< 1,0 y < 0,5 ppm, abril y junio, respectivamente; datos no publicados). De acuerdo a los valores observados de conductividad y salinidad, las aguas de la isla pueden clasificarse como de mediana ($250\text{-}750 \mu\text{Mhos/cm}$) y alta ($750\text{-}2250 \mu\text{Mhos/cm}$) salinidad dentro del rango limnético.

La alcalinidad también es alta dentro del rango limnético lo cual también sugiere influencias geológicas y marítimas. Por ejemplo, ésta fue similar a la de quebradas de zonas de karso de Puerto Rico (rango: 32,8-215,9 mg CaCO_3/l , Blanco y Scatena 2006) y superior a las observada

en quebradas continentales suramericanas (Wetzel 2001). Esto no es sorprendente porque la concentración de carbonatos y calcio puede ser mayor en ríos que atraviesan rocas volcánicas que en granitos y areniscas, aunque menor que a través de calizas y karsos (Wetzel 2001). En la Isla Gorgona, la proporción de $\text{CaO}:\text{Al}_2\text{O}_3$ en las komatiitas es mayor que la observada en otras partes del mundo y pueden clasificarse dentro del campo sub-alcalino (Llinás et al. 1990). Además, algunas rocas pueden tener contenidos de CaO de hasta 22% (Echeverría y Aiken 1986). Estudios posteriores también podrían explorar qué fracción del calcio entra con los aerosoles y el polvo atmosférico como se ha evidenciado en cuencas costeras del Caribe (similar a lo documentado en Costa Rica y Puerto Rico: Eklund et al. 1997, Heartsill-Scalley et al. 2007, McDowell et al. 1990), dado que sus valores son cercanos o superiores (Calá, 1990: $\text{Ca} = 15 \text{ mg/l}$, Vásquez et al. 1996: 6-8 mg/l) al promedio suramericano continental (7,2 mg/l; Wetzel 2001). De hecho, Chadwick et al. (1999) documentaron que en el archipiélago de las islas Hawaii, la contribución del calcio atmosférico aumenta exponencialmente después de los 10.000 años debido a la lixiviación progresiva del calcio por meteorización de las rocas. Adicionalmente, los altos contenidos de MgO que contienen las komatiitas, basaltos, breccias y picritas de la Isla Gorgona (11-27%: Aitken y Echeverría 1984, Echeverría y Aitken 1986, Llinás et al. 1990) podrían contribuir al incremento de la alcalinidad a través de la asociación entre los magnesios y los bicarbonatos.

La alta concentración de cloruros en las aguas corrientes de la Isla Gorgona (rango: 2-7 mg/l) también sugiere una fuerte influencia marina. Esta es mayor (en algunas quebradas) que el promedio de ríos continentales en Suramérica (4,9 mg/l) y coincide con los valores observados

en sitios con influencia de lluvia marina y costera (Wetzel 2001). Sin embargo, las concentraciones de cloruros en la Isla Gorgona son menores que en las quebradas prístinas costeras del Caribe (Puerto Rico: McDowell et al. 1990, Costa Rica: Eklund et al. 1997). Valdría la pena explorar posteriormente si la deposición de sales marinas y polvo sobre la Isla Gorgona es por la ruta húmeda, contrario al Caribe donde la deposición es seca por los fuertes vientos y brisas marinas (Cavelier et al. 1997, Heartsill-Scalley et al. 2007, Stallard 2001). Según Asbury et al. (1994) una cantidad considerable de cloruros puede entrar por medio de la intercepción del agua de las nubes, por lo tanto este podría ser un mecanismo a investigar en los bosques de niebla de la isla. En sitios con actividad volcánica también se observa alta concentración de cloruros en aguas de lluvias y de escorrentía, ya sea por la emisión de cenizas o por los manantiales de aguas termales (Lobo-Guerrero 1993, Pringle y Triska 1991, Ramos-Escobedo y Vásquez 2001, Veneklaas 1990), aunque este no es el caso de Isla Gorgona. Finalmente, se descarta la existencia de vertimientos puntuales o difusos de aguas residuales ya que los valores de cloruros en la isla también son inferiores a los observados en quebradas naturales y contaminadas de Puerto Rico (Blanco y Scatena 2006: 7,6-1.591,2 mg/l).

Los sulfatos en la Isla Gorgona son menores que el promedio de Suramérica (<4,8 mg/l), debido probablemente a que su contenido es bajo en rocas volcánicas (Wetzel 2001). Esto apoyaría la hipótesis de la meteorización de las islas volcánicas (Chadwick et al. 1999). Por otro lado, la contribución atmosférica parece baja. Se ha encontrado que las emisiones de gases de azufre del volcán Soufrière en la isla de Monserrate (Antillas Menores) pueden introducir cantidades considerables de sulfatos

en la lluvia de la isla de Puerto Rico ubicada a 500 km al noroeste (Heartsill-Scalley et al. 2007). Estudios en la cordillera central de Colombia también han encontrado que las emisiones de cenizas del Volcán Nevado del Ruíz aumentan la concentración de sulfatos y otros aniones y cationes en la lluvia, las cuales son más bajas en condiciones normales que las observadas en Puerto Rico y otros sitios insulares (Veneklaas 1990). Esto sugiere que en el Pacífico colombiano no hay actividad volcánica o industrial en cientos de kilómetros a la redonda que contamine las quebradas de la Isla Gorgona. Fuentes alternativas de este anión pueden ser las rocas sedimentarias (Allan 1995, Wetzel 2001) y aerosoles que acarrean CaSO_4 (Wetzel 2001).

Otra evidencia de la contribución de las rocas volcánicas a la hidroquímica de las quebradas de la isla es su concentración de fósforo total. Esta es mayor que la observada en quebradas que atraviesan geologías mixtas (volcánicas y sedimentarias) como la del noreste de Puerto Rico (McDowell y Asbury 1994) y la de los Andes venezolanos (Allan et al. 2006). Más aun, los valores son similares a los observados en quebradas de Costa Rica que son enriquecidas con aguas termales superficiales en zonas volcánicas activas (<700 $\mu\text{g/l}$; Triska et al. 2006). Características similares han sido observadas en quebradas que drenan cuencas volcánicas en los Tuxtlas (México: Ramos-Escobedo y Vásquez 2001). Aunque en la Isla Gorgona no hay reportados manantiales termales, si hay fumarolas submarinas en el arrecife conocido como La Azufrada que emiten burbujas con olor a azufre perceptible (observaciones personales). Estudios posteriores podrían someter a prueba si la fuente principal del fósforo en las quebradas son los basaltos, komatiitas y picritas de la isla que, según Echeverría y Aitken (1986), están conformados en 1% por P_2O_5 . De acuerdo a la

hipótesis del origen ultramáfico de los flujos de lava komatiíticos y de la rápida cristalización de flujos submarinos (Dietrich et al. 1981), las rocas podrían ser fácilmente meteorizables. La baja concentración de hierro disuelto en las aguas de la Isla Gorgona (este estudio: $< 0,039$ mg/l, Calá 1990: $< 0,1$ mg/l) puede deberse a su tendencia a precipitarse en forma de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (hidróxido férrico) en pH entre 5 y 8 (Wetzel 2001), así su contenido sea relativamente alto en las rocas volcánicas de la isla (7-20%: Aitken y Echeverría 1984, Echeverría y Aitken 1986, Llinás et al. 1990).

El carbono orgánico disuelto fue mayor en la Isla Gorgona (10-80 mg/l) que en la Sierra de Luquillo (< 12 mg/l; McDowell y Asbury 1994) y varias cuencas con fuerte presión antrópica (< 11 mg/l; Lugo y Quiñones 1983) en Puerto Rico, el piedemonte de los Andes de Venezuela (< 2 mg/l; Allan et al. 2006), y los Andes peruanos que alimentan el río Amazonas (sitios pobres: < 5 mg/l; sitios ricos: > 20 mg/l; McClain et al. 1995, McClain y Richey 1996, Townsend-Small et al. 2005). En el caso de la Isla Gorgona es interesante porque la ubica por encima de los anteriores estudios que representan: **a)** mosaicos de usos agrícolas y urbanos, **b)** bosques húmedos subtropicales, **c)** bosques alto-andinos (puna y bosque de niebla) y **d)** “*campinas*” de tierra firme en el Amazonas. Los aportes de hojarasca y materia orgánica fragmentada (aunque no han sido cuantificados) desde la selva húmeda y el bosque de niebla de la Isla Gorgona podrían contribuir a las altas concentraciones de carbono orgánico disuelto. Recientemente, se ha identificado que el carbono inorgánico e orgánico disuelto tienen la misma señal isotópica que el fraccionado en las cabeceras de las quebradas amazónicas del piedemonte de los Andes peruanos (Townsend-Small et al. 2007). La concentración de carbono orgánico disuelto también depende de la ruta (*flow path*)

que sigue la escorrentía a través del dosel, los troncos y el suelo antes de llegar al cauce (McDowell y Asbury 1994). En la Isla Gorgona, es notable que las tres cuencas con los bosques posiblemente más maduros (no intervenidos durante la época de la prisión: El Roble, La Camaronera, Cocal Norte) aunque tienen materiales parentales diferentes presentaron las concentraciones más altas de carbono orgánico disuelto, lo cual apoyaría las hipótesis de: **a)** el fraccionamiento de la hojarasca o **b)** el flujo a través de capas gruesas de hojarasca acumuladas en el suelo del bosque. Sin llegar a ser el caso de los ríos de aguas negras tributarios del Amazonas, las quebradas de la isla parecen tener las concentraciones de carbono orgánico disuelto más altas hasta ahora reportadas en el neotrópico. Valdría la pena expandir los estudios a los bosques de selvas húmedas del piedemonte del Chocó biogeográfico para confirmar este patrón. Aunque han pasado más de 25 años desde que Lugo y Quiñones (1983) llamaron la atención sobre la escasez de estudios sobre carbono en ríos tropicales, esta situación no ha cambiado en el neotrópico con excepción de las regiones arriba mencionadas. Finalmente, la proporción C:P > 106 sugiere una limitación por fósforo, también observada en quebradas de Hawaii (Larned y Santos 2000). Esta limitación de fósforo acompañada con la baja irradianza ocasionan una baja biomasa de perifiton en la Isla Gorgona (datos sin publicar); sin embargo, deben hacerse estudios de enriquecimiento para verificar cual de los dos factores limita dicha producción primaria (e.g., Larned y Santos 2000).

Lastimosamente los estudios sobre hidroquímica de las quebradas de Colombia son escasos, particularmente sobre aguas con influencia geotermal (e.g., Lobo-Guerrero 1993), aunque la mayor parte de los estudios de bioindicación y sanitarios incluyen parámetros físico-químicos

básicos (Roldán y Ruíz 2001). Los datos disponibles de pH, conductividad, bicarbonato y algunos iones y nutrientes de los principales ríos de Colombia soportan lo mencionado anteriormente para los ríos suramericanos en los cuales no se observa una influencia marítima por medio de aerosoles y hay baja concentración de iones (Osorio et al. 2003, Roldán y Ruíz 2001). Por otro lado, solamente existen dos estudios sobre química de lluvia y de flujo a través de follaje en bosques alto andinos (Figueroa y Valverde 2001, Veneklaas 1990).

Patrones temporales. Los resultados de este estudio sugieren que las crecientes tienen un fuerte efecto sobre las características físico-químicas de las quebradas como ha sido ampliamente documentado en la literatura (Allan 1995, McClain et al. 1998, Wetzel, 2001). Durante la época de crecientes se disminuye la temperatura del agua, aumenta la concentración de oxígeno disuelto, y disminuyen el pH y la alcalinidad. Las bajas temperaturas y una mayor mezcla turbulenta pueden explicar las altas concentraciones de oxígeno disuelto observadas durante junio. Vásquez et al. (1996) reportó que las partes altas de quebradas como Pizarro pueden registrarse hasta 18 °C, una temperatura bastante baja dada la ubicación tropical de la isla y su cercanía al nivel del mar. El pH usualmente disminuye con la entrada de agua de lluvia, la cual es ligeramente ácida. Por otra parte, teóricamente, la alcalinidad disminuye por el lavado del carbonato de calcio, el cual es altamente soluble y su principal reservorio son las arcillas del suelo y el material orgánico acumulado en los troncos y follaje del bosque. Este mismo patrón observado en el carbono orgánico disuelto también podría ser explicado por el sobrelavado del suelo. El fósforo aumentó durante la época de lluvias posiblemente porque éste se disuelve por la meteorización de las rocas basálticas. La proporción C:P disminuyó

debido a la disminución del C y al aumento del P. Finalmente, los cloruros aumentaron durante la época de lluvias. Sin embargo, el hecho que la conductividad no sea significativamente menor durante junio sugiere que los iones de reservorios lábiles (e.g., suelo) son reemplazados por iones que entran con la meteorización de las rocas o deposición húmeda. Los anteriores resultados son consistentes con lo observado en cuencas costeras en climas lluviosos de Costa Rica (Pringle et al. 1990, 1993, Triska et al. 2006) y Puerto Rico (McDowell y Asbury 1994, Schaefer et al. 2000).

Patrones espaciales. No todas las quebradas respondieron de igual manera al disturbio hidrológico posiblemente debido a las diferencias en su geología (sedimentaria o volcánica), geomorfología (tamaño, pendiente del tramo) o usos anteriores de la tierra (tala rasa, cultivos o plantaciones de árboles).

La baja conductividad en Ilú, La Camaronera y El Roble coincide con una geología predominantemente sedimentaria la cual puede retener mejor los iones en solución por medio de las arcillas contrario a lo que puede suceder en las otras quebradas con geologías volcánicas y poco desarrollo del suelo. Vásquez et al. (1996) ya habían informado sobre la variabilidad de la conductividad entre quebradas (rango: 50-245 $\mu\text{Mhos/cm}$, La Piscina y Las Mercedes, respectivamente). Los basaltos de la isla también tienen una gran heterogeneidad isotópica (Kerr 2005) lo cual sugiere no solo diferentes orígenes y procesos de enfriamiento de las rocas, sino también su capacidad de meteorización durante la época de lluvias y por lo tanto la influencia sobre la conductividad y la concentración de fósforo.

El área de las cuencas puede ser un factor importante para la dinámica hidroquímica. Ilú

también mostró poca variación temporal de carbono, fósforo y cloruro (a pesar de que el caudal incrementó cinco veces) posiblemente porque es la cuenca más grande y debería tener el periodo más largo de concentración de escorrentía. Por el contrario, la corta longitud y pronunciada pendiente en El Roble genera cortos tiempos de concentración de la escorrentía después de las lluvias torrenciales o infiltración de las aguas a través del lecho de gravas y los grandes bloques durante la época de sequía, lo cual podría explicar el bajo pH. El contraste observado en la conductividad en esta quebrada (baja en abril pero alta en junio durante una creciente) puede indicar que la disolución de las rocas y la erosión del suelo ocurren predominantemente durante las crecientes.

La concentración de cloruros presenta un gradiente norte sur en ambos lados de la isla consistente con el patrón predominante de vientos que podrían aportar aerosoles (Giraldo et al. 2008). Adicionalmente, se observó el valor más alto en Pizarro en abril probablemente debido a una fuerte lluvia ocurrida el día anterior después de un periodo prolongado de sequía que pudo promover deposición seca de cloruros. Esto es apoyado por el hecho que los cloruros aumentaron en todas las quebradas (excepto Pizarro) durante la época de lluvias (junio). Por otro lado, la relación espacial entre los cloruros y el caudal fue inversa durante la época de lluvias lo que sugiere que este anión puede sobrelavarse por el exceso de escorrentía en algunas quebradas. El Chorro de Cura pudo además presentar la mayor concentración de cloruros durante junio debido posiblemente a la extracción de agua que le estaban realizando (por lo tanto no aumentó el caudal), concentrando así el aporte de los aerosoles y de la lluvia.

El fósforo parece ser fácilmente erosionable por su incremento en junio. Las mayores

concentraciones se presentaron en El Muelle y El Chorro del Cura posiblemente debido a su bajo caudal, aunque no se descarta un efecto de la vegetación y derrumbes dado que están cubiertas por rastros bajos. Finalmente, el carbono orgánico disuelto podría reflejar las diferencias en cobertura vegetal entre cuencas. El Roble, La Camaronera y Cocal Norte, cuencas con los bosques más desarrollados y conservados (UAESPNN-DTSO 2005), presentaron los valores más altos en verano y la mayor reducción en invierno. Por otra parte, Iguapoga, Ilú, Chorro del Cura y El Aeropuerto, siendo bosques secundarios y rastros presentaron valores intermedios en verano y una menor reducción en invierno. El Muelle presentó la mayor variabilidad entre las quebradas con crecimiento secundario.

Posibles efectos ecológicos. El mosaico de nutrientes y elementos disueltos entre las diferentes quebradas de Isla Gorgona podría causar un mosaico del perifiton y de los macroinvertebrados similar a lo observado en paisajes volcánicos centroamericanos (Pringle et al. 1993, Ramírez et al. 2006, Ramos-Escobedo y Vásquez 2001). De hecho, Gómez-Aguirre et al. (2009) encontró que la distribución de insectos y camarones en las quebradas de la isla se relaciona con el pH. Adicionalmente, existen marcadas diferencias entre las quebradas en cuanto a la cantidad de materia orgánica e inorgánica y de clorofila en el epilíton (datos sin publicar).

Por otra parte, las exportaciones de material disuelto y fragmentado podrían promover la sedimentación o el sobrecrecimiento algal en las formaciones coralinas de la isla, las cuales son las más desarrolladas del Pacífico colombiano (Zapata 2001). Anecdóticamente se menciona que estos arrecifes son afectados por la pluma turbia de los ríos Patía, Sanquianga y Guapi, los

cuales tiene los caudales más grandes del sur de la costa Pacífica colombiana (Zapata 2001). Sin embargo, el aporte continuo de agua dulce y elementos disueltos y particulados desde la Isla podría ser más crónico. Por ejemplo, Zapata (2001) menciona que el área y la riqueza de corales (desapareciendo los corales masivos) en El Muelle disminuyeron entre 1979 y 2001. Adicionalmente, las estimaciones disponibles de tasas de sedimentación sugieren que hay una gran variabilidad entre y dentro de las formaciones coralinas (Zapata et al. 2001). Por ejemplo, en la zona trasera de La Azufrada y Playa Blanca se cuantificaron 95 y 293 g/m²/día, respectivamente, considerados en la literatura como nocivos para la salud arrecifal. Precisamente estas dos formaciones reciben la descarga de las quebradas El Aeropuerto (ó El Pienemono) y El Roble, las cuales aportan un caudal que varía entre 1 y 75 m³/s entre verano e invierno, y pueden aportar entre 90 y > 3.000 mg/s de carbono orgánico disuelto y 0,4 y 46 mg/s de fósforo total. La formación coralina de El Muelle recibe el aporte de agua dulce de la quebrada homónima (rango verano-invierno: 8-20 m³/s), con una carga menor de carbono (454-258 mg/s) pero una mayor de fósforo (7-106 mg/s). De todas formas, las exportaciones de elementos disueltos son mayores hacia El Muelle que hacia La Azufrada y a Playa Blanca durante el verano. Lo anterior aunque no es una prueba contundente de la influencia de las quebradas sobre la sedimentación, mortalidad de coral y sobre-crecimiento algal en la zona costera de la isla, invita a que se hagan estudios posteriores sobre las interacciones tierra-océano. En el Caribe se ha documentado que efectivamente existe una correlación entre el incremento de la carga de sedimentos suspendidos y elementos y nutrientes disueltos en los ríos costeros y el deterioro de la salud de los arrecifes coralinos (Restrepo et al. 2006, Warne et al. 2005).

En conclusión, las aguas superficiales de la isla pueden clasificarse como prístinas por los bajos contenidos de nitrógeno, coliformes fecales y cloruros (desde el punto de vista sanitario). La litología volcánica, predominantemente basáltica y ultramáfica intrusiva, refleja el origen volcánico de la Isla y aparentemente explica la presencia de aguas salinas, neutro-alcalinas y ricas en fósforo total. Existen, aparentemente, aportes atmosféricos por medio de aerosoles, evidenciados por el alto contenido de cloruros. También es posible que el desarrollo del bosque y los usos pasados tengan una influencia sobre la concentración de carbono orgánico disuelto. No hay evidencias de aportes atmosféricos de azufre de origen industrial o volcánico, aunque existen emisiones submarinas en La Azufrada. El disturbio hidrológico altera la concentración de los elementos dependiendo de su naturaleza y de las características de las cuencas. Finalmente, el mosaico geológico de la isla podría tener una influencia sobre las comunidades lólicas y costero-marinas.

Para avanzar en el entendimiento de los procesos biogeoquímicos de la Isla, se recomienda: **i)** realizar estudios sobre la química de la lluvia y del flujo a través del follaje para contrastar la importancia de las fuentes atmosféricas y biológicas (e.g., epífitas del dosel) sobre el enriquecimiento del agua que atraviesa el bosque; **ii)** estudiar la química del agua que atraviesa la hojarasca y el suelo por infiltración utilizando lisímetros para entender el papel de los lixiviados de carbono orgánico e inorgánico; y **iii)** realizar un monitoreo mensual de la química del agua de las quebradas, al menos en Ilú, Iguapoga y Chorro del Cura (las más cercanas a El Poblado) utilizando un mayor número de cationes y aniones para discernir mejor entre las fuentes geológicas, atmosféricas y biológicas y para entender su dinámica en función de la precipitación y otros procesos atmosféricos.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el Comité Central de Apoyo a la Investigación (CODI) de la Universidad de Antioquia a través del proyecto “Gorgona Island Stream Bio-Assessment” y realizada bajo el permiso de investigación biológica DTSO-G-03/08 emitido por la Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales. Agradezco a Juan Carlos Arias por la toma de muestras. Magnolia Longo, Ana María Gómez, Justino Bonilla y Héctor Javier Montaña también participaron en el trabajo de campo. El Grupo de Limnología Básica y Experimental de la Universidad de Antioquia prestó equipos y reactivos. Los comentarios de un evaluador anónimo y de Alonso Ramírez contribuyeron a mejorar el manuscrito.

REFERENCIAS

- Aitken BG, Echeverría LM. 1984. Petrology and geochemistry of komatiites and tholeiites from Gorgona Island, Colombia. *Contributions in Mineral Petrology*, 86: 94-105.
- Allan D. 1995. Stream ecology. Structure and function of running waters. Dordrecht: Kluwer. p 387.
- Allan JD, Flecker AS, Segnini S, Taphorn DC, Sokol E, Kling GW. 2006. Limnology of Andean piedmont rivers of Venezuela. *Journal of the North American Benthological Society*, 25: 66-81.
- Blanco JF, 2009. The hydroclimatology of Gorgona Island: seasonal and ENSO-related patterns. *Actualidades Biológicas*, 31(91): 111-121.
- Blanco JF, Scatena FN. 2006. Hierarchical contribution of river-ocean connectivity, water chemistry, hydraulics, and substrate to the distribution of diadromous snails in Puerto Rican streams. *Journal of the North American Benthological Society*, 25: 82-98.
- Blanco JF, Ramírez A, Scatena FN. 2009. The streams of Gorgona Natural National Park within the global context: an introduction to the special issue. *Actualidades Biológicas*, 31(91): 105-110.
- Calá P. 1990. Biodiversidad en aguas dulces de la isla. En: Aguirre J, Rangel O, editores. *Biota y ecosistemas de Gorgona*. Bogotá (Colombia): Fondo FEN. p. 263-274.
- Cavelier J, Jaramillo M, Solis D, de León D. 1997. Water balance and nutrient inputs in bulk precipitation in tropical montane cloud forest in Panama. *Journal of Hydrology*, 193: 83-96.
- Chadwick OA, Derry LA, Vitousek PM, Huebert BJ, Hedin LO. 1999. Changing sources of nutrients during four million years of ecosystem development. *Nature*, 397: 491-497.
- Condit R, Robinson WD, Ibáñez D, Aguilar R, Sanjurjo A, Martínez A, Stallard R, García RF, Angehr T, Petit GR, Wright SJ, Robinson TR, Heckadon MS. 2001. The status of the Panama Canal Watershed and Its biodiversity at the beginning of the 21st Century. *Bioscience*, 51: 389-398.
- Díaz JM, López M, Barrios LM. 2001. Introducción. En: Barrios LM, López M, editores. *Gorgona marina: contribución al conocimiento de una isla única*. Serie Publicaciones Especiales No. 7. Santa Marta (Colombia): INVEMAR. p. 13-16.
- Dietrich VJ, Gansser A, Sommerauer J, Cameron WE. 1981. Palaeogene komatiites from Gorgona Island, East Pacific-A primary magma for ocean floor basalts? *Geochemical Journal*, 15: 141-161.
- Echeverría LM, Aiken BG. 1986. Pyroclastic rocks: another manifestation of ultramafic volcanism of Gorgona Island, Colombia. *Contributions to Mineral Petrology*, 92: 428-436.
- Eklund TJ, McDowell W, Pringle CM. 1997. Seasonal patterns in tropical precipitation chemistry: La Selva, Costa Rica. *Atmospheric Environment*, 31: 3903-3910.
- Figueroa A, Valverde AJ. 2001. Análisis del aporte de nutrientes por precipitación y a través del follaje en un ecosistema altoandino. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas*, 12: 62-68.
- Gansser A. 1950. Geological and petrological notes on Gorgona island in relation to north-west S America. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 30: 219-237.
- Giraldo A, Rodríguez-Rubio E, Zapata F. 2008. Condiciones oceanográficas en isla Gorgona, Pacífico oriental tropical de Colombia. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 36: 121-128.
- Gómez-Aguirre AM, Longo-Sánchez MC, Blanco JF. 2009. Macroinvertebrate assemblages in Gorgona Island streams: spatial patterns during two contrasting hydrologic periods. *Actualidades Biológicas*, 31(91): 161-178.
- Gordon NA, McMahon TA, Finlayson BL, Gippel CJ, Nathan RJ. 2004. *Stream Hydrology: An Introduction for Ecologists*. Segunda edición. Chichester, Reino Unido: Wiley.
- Harrison AD, Rankin JJ. 1976. Hydrobiological studies of Eastern Lesser Antillean islands. *Archives fur Hydrobiologie, supplement*, 50: 96-144.

- Heartsill-Scalley T, Scatena FN, Estrada C, McDowell WH, Lugo AE. 2007. Disturbance and longterm patterns of rainfall and throughfall nutrient fluxes in a subtropical wet forest in Puerto Rico. *Journal of Hydrology*, 333: 472-485.
- Hedin LO, Armesto JJ, Johnson AH. 1995. Patterns of nutrient loss from unpolluted, old-growth temperate forests: evaluation of biogeochemical theory. *Ecology*, 76: 493-509.
- Kerr AC. 2005. La Isla de Gorgona, Colombia: A petrological enigma? *Lithos*, 84: 77-101.
- Larned ST, Santos SR. 2000. Light- and nutrient-limited periphyton in low order streams of Oahu, Hawaii. *Hydrobiologia*, 432:101-111.
- Lewis WM, Melack JM, McDowell WH, McClain M, Richey JE. 1999. Nitrogen yields from undisturbed watersheds in the Americas. *Biogeochemistry*, 46: 149-162.
- Llinás R, Pinto J, Peña F, Caro F. 1990. Geología. En: Aguirre J, Rangel O, editores. *Biota y ecosistemas de Gorgona*. Bogotá (Colombia): Fondo FEN. p. 55-65.
- Lobo-Guerrero A. 1993. Hidrología e hidrogeología. En: Leyva P, editor. *Colombia Pacífico*. Tomo 1. Proyecto Biopacífico (INDERENA-DNP-GEF-PNUD-COL/92/G31). Bogotá (Colombia): Fondo para la Protección del Medio Ambiente "José Celestino Mutis", FEN COLOMBIA. Fecha de acceso: 2009 Ago 28. Disponible en: <http://www.lablaa.org/blaavirtual/faunayflora/pacific1/cap9.htm>.
- Lugo AE, Quiñones F. 1983. Organic carbon export from intensively used watersheds in Puerto Rico. *Mitteilungen of Geology-Paleontology Institute, University of Hamburg*-, SCOPE/UNEP Special Issue 55: 237-242.
- Matson PA, McDowell WH, Townsend AR, Vitousek PM. 1999. The globalization of N deposition: ecosystem consequences in tropical environments. *Biogeochemistry*, 46: 67-83.
- McClain ME, Naiman RJ. 2008. Andean influences on the biogeochemistry and ecology of the Amazon River. *Bioscience*, 58: 325-338.
- McClain ME, Richey JE. 1996. Regional-scale linkages of terrestrial and lotic ecosystems in the Amazon basin: a conceptual model for organic matter. *Archives fur Hydrobiologie (supplement Large Rivers 10)*, 113: 111-125.
- McClain M, Bilby RE, Triska FJ. 1998. Nutrient cycles and responses to disturbance. In: Naiman RJ, Bilby RE, editors. *River Ecology and Management. Lessons from the Pacific Coastal Ecoregion*. Nueva York: Springer. p. 705.
- McClain ME, Richey JE, Victoria RL. 1995. Andean contributions to the biogeochemistry of the Amazon River system. *Bulletin Intitute Francaise des Etudes Andines*, 24: 1-13.
- McDowell WH. 1991. Nutrient and major element chemistry of Caribbean rain forest streams. *Verhandlungen Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, 24: 1720-1723.
- McDowell WH. 2001. Hurricanes, people, and riparian zones: controls on nutrient losses from forested Caribbean watersheds. *Forest Ecology and Management*, 154: 443-451.
- McDowell WH, Asbury CE. 1994. Export of carbon, nitrogen, and major ions from three tropical montane watersheds. *Limnology and Oceanography*, 39: 111-125.
- McDowell WH, Ginés-Sánchez C, Asbury CE, Ramos-Pérez CR. 1990. Influence of sea salt aerosols and long range transport on precipitation chemistry at El Verde, Puerto Rico. *Atmospheric Environment*, 24A: 2813-2821.
- McDowell WH, Lugo AE, James A. 1995. Export of nutrients and major ions from Caribbean catchments. *Journal of the North American Benthological Society*, 14: 12-20.
- McDowell WH, McSwiney CP, Bowden WB. 1996. Effects of hurricane disturbance on groundwater chemistry and riparian function in a tropical rain forest. *Biotropica*, 28: 577-584.
- Osorio JC, López-Rendón JE, Hermelin M. 2003. Balance geoquímico para la cuenca alta del río Medellín. Cordillera Central (Antioquia, Colombia). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias*, 27: 71-84.
- Perakis SS, Hedin LO. 2002. Nitrogen loss from unpolluted South American forests mainly via dissolved organic compounds. *Nature*, 415: 416-419.
- Pringle CM, Triska FJ. 1991. Effects of geothermal groundwater on nutrient dynamics of a lowland Costa Rican stream. *Ecology*, 72: 951-965.
- Pringle CM, Triska FJ, Browder G. 1990. Spatial variation in basic chemistry of streams draining a volcanic landscape on Costa Rica's Caribbean slope. *Hydrobiologia*, 206: 73-85.
- Pringle CM, Lowe GL, Triska FJ, Fernández JF, West J. 1993. Landscape linkages between geothermal activity and solute composition and ecological response in surface waters draining the Atlantic slope of Costa Rica. *Limnology and Oceanography*, 38: 753-774.
- Ramírez A, Pringle CM, Douglas M. 2006. Temporal and spatial patterns in stream physicochemistry and insect assemblages in tropical lowland streams. *Journal of the North American Benthological Society*, 25: 108-125.
- Ramos-Escobedo MG, Vázquez G. 2001. Major ions, nutrients and primary productivity in volcanic neotropical streams draining rainforest and pasture catchments at Los Tuxtlas, Veracruz, Mexico. *Hydrobiologia*, 445: 67-76.
- Restrepo JD, Zapata P, Díaz JM, Garzón-Ferreira J, García CB. 2006. Fluvial fluxes into the Caribbean Sea and their impact on coastal ecosystems: The Magdalena River, Colombia. *Global and Planetary Change*, 50: 33-49.
- Roldán G, Ruíz E. 2001. Development of limnology in Colombia. In: Wetzel RG, Gopal B, editors. *Limnology*

- in developing countries. New Delhi (India): International Scientific Publication, 3: 69-119.
- Schaefer DA, McDowell WH, Scatena FN, Asbury CE. 2000. Effects of hurricane disturbance on stream water concentrations and fluxes in eight tropical forest watersheds of the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico. *Journal of Tropical Ecology*, 16: 189-207.
- Stallard RF. 2001. Possible environmental factors underlying amphibian decline in eastern Puerto Rico. *Analysis of U.S. Government Data Archives. Conservation Biology*, 15: 943-953.
- Townsend-Small A, McClain ME, Brandes JA. 2005. Contributions of carbon and nitrogen from the Andes Mountains to the Amazon River: Evidence from an elevational gradient of soils, plants, and river material. *Limnology and Oceanography*, 50: 672-685.
- Townsend-Small A, Noguera JL, McClain ME, Brandes JA. 2007. Radiocarbon and stable isotope geochemistry of organic matter in the Amazon headwaters, Peruvian Andes. *Global Biogeochemical Cycles*, 21. GB2029. Disponible en: doi: 10.1029/2006GB002835
- Triska FJ, Pringle CM, Duff JH, Avanzino RJ, Ramírez A, Ardón M, Jackman AP. 2006. Soluble reactive phosphorus transport and retention in tropical rainforest streams draining a volcanic and geothermally active landscape in Costa Rica: Long-term concentration patterns, pore water environment and response to ENSO events. *Biogeochemistry*, 81: 131-143.
- UAESPNN-DTSO. 2005. Plan de Manejo Parque Nacional Natural Gorgona. Resumen Ejecutivo. Cali (Colombia): Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales de Colombia Dirección Territorial Suroccidental. SUT 021105.
- Valencia-G. SM, Lizarazo-M. PX. 2009. Caracterización de la composición microbiana de cuatro quebradas del Parque Nacional Natural Gorgona. *Actualidades Biológicas*, 31(91): 213-226.
- Valencia-G. SM, Pérez-Z. GA, Lizarazo-M. PX, Blanco JF. 2009. Patrones espacio-temporales de la estructura y composición de la hojarasca en las quebradas del Parque Nacional Natural Gorgona. *Actualidades Biológicas*, 31(91): 197-211.
- Vásquez GL, Naundorf GI, Zamora H. 1996. Caracterización físico-química de ecosistemas dulceacuicolas del Parque Natural Nacional Isla Gorgona, Departamento del Cauca. *Unicauca Ciencia (Universidad del Cauca)*, 1: 19-24.
- Veneklass EJ. 1990. Nutrient fluxes in bulk precipitation and throughfall in two montane tropical rain forests, Colombia. *Journal of Ecology*, 78: 974-992.
- Warne AG, Webb RMT, Larsen MC. 2005. Water, sediment, and nutrient discharge characteristics of rivers in Puerto Rico, and their potential influence on coral reefs. San Juan (PR): US Geological Survey. Scientific Investigations Report 2005-5206.
- Wetzel RG. 2001. *Limnology. Lake and river ecosystems*. Tercera edición. San Diego (CA): Academic Press. p. 1006.
- Zapata F. 2001. Formaciones coralinas de Isla Gorgona. En: Barrios LM, López M, editores. *Gorgona marina: contribución al conocimiento de una isla única*. Serie Publicaciones Especiales No. 7. Santa Marta (Colombia): INVEMAR. p. 27-40.
- Zapata F, Vargas-Angel B, Garzón-Ferreira J. 2001. Salud y conservación de las comunidades coralinas. En: Barrios LM, López M, editores. *Gorgona marina: contribución al conocimiento de una isla única*. Serie Publicaciones Especiales No. 7. Santa Marta (Colombia): INVEMAR. p. 41-50.
- Zar JH. 1999. *Biostatistical analysis*. Cuarta edición. Upper Saddle River (NJ): Prentice Hall. p. 663.