

Artículo de  
InvestigaciónCaracterización ecológica de cuencas utilizadas por el delfín rosado  
*Inia geoffrensis* en Colombia, a través de modelamiento de nichoTatiana Velásquez-Roa<sup>1</sup>, Juan David Carvajal-Castro<sup>1</sup>, Hugo Mantilla-Meluk<sup>1</sup>, Fernando Trujillo<sup>2</sup> y Federico Mosquera-Guerra\*<sup>2</sup><sup>1</sup>Programa de Biología, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia.<sup>2</sup>Fundación Omacha, Bogotá D.C. Colombia.

## Autor para Correspondencia\*:

federico.mosquera guerra@gmail.com

Recibido 05 de julio de 2015.  
Aceptado 25 de diciembre 2015.

## Resumen

Aunque los delfines rosados son mamíferos acuáticos obligados, variables ambientales atmosféricas asociadas a las cuencas de los ríos que habitan, como la precipitación y la temperatura, se constituyen en determinantes de su ecología, afectando directamente su ocurrencia en un área particular. Para Colombia, se reconocen dos subespecies de *Inia geoffrensis*, distribuidas en las cuencas del Orinoco (*Inia geoffrensis humboldtiana*) y Amazonas (*Inia geoffrensis geoffrensis*). Accidentes geomorfológicos como los rápidos, se han sugerido como barreras que separan las poblaciones naturales de delfines, promoviendo potencialmente procesos de especiación que pueden estar siendo reforzados por ecologías contrastantes entre cuencas. A la fecha, no se cuenta con un análisis comprensivo sobre la diferenciación ecológica entre las cuencas habitadas por las subespecies de *Inia geoffrensis*. En este trabajo, a través de herramientas de modelamiento de nicho, investigamos la potencial diferenciación ecológica entre las dos subespecies de *Inia* para el territorio colombiano. Los modelos aquí presentados fueron construidos usando el algoritmo MaxEnt a través de la integración de 8435 avistamientos de delfines (*I. g. geoffrensis* N= 3592 y *I. g. humboldtiana* N= 4843), y 22 variables ambientales derivadas de la base de datos Bioclim e Hydrosched, que fueron parametrizadas en el programa R. Las áreas con alta disponibilidad para los delfines rosados, realizadas por nuestros modelos, fueron congruentes con la distribución previa propuesta para las dos subespecies en Colombia y estuvieron fuertemente soportadas por la métrica del área bajo la curva (AUC 0,985). Nuestros resultados sugieren una diferenciación ecológica entre las cuencas ocupadas por las subespecies de delfines rosados. En globalidad, concluimos que factores externos al ambiente acuático, tienen participación en la diferenciación ecológica entre las subespecies de *I. geoffrensis*.

**Palabras claves:** Delfines rosados, Modelamiento, MaxEnt, Condiciones Climáticas, Sistemas de Información Geográfica.

## Abstract

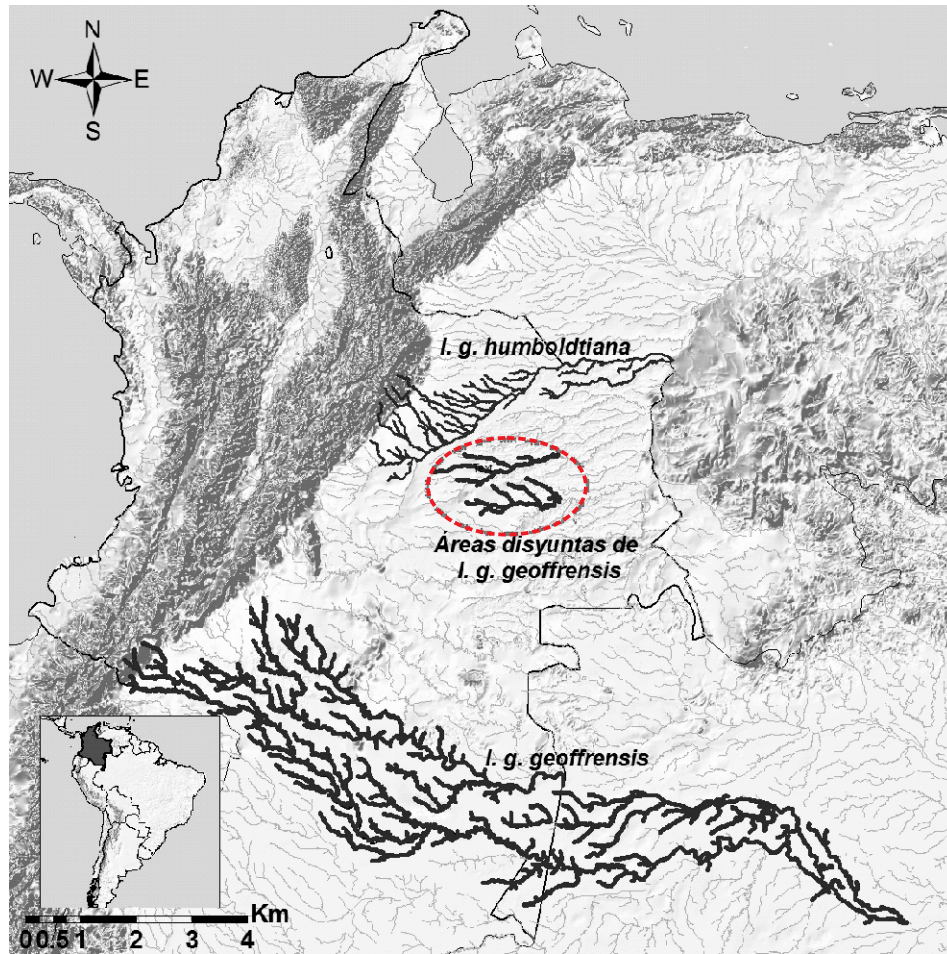
Although dolphins are entirely aquatic mammals, non-aquatic environmental variables associated with the basins they inhabit, such as precipitation and temperature, are likely to determine some aspects of their ecology directly affecting the species occurrence in a particular area. For Colombia, two subspecies of *Inia geoffrensis* are thought to be distributed across the eastern lowlands of the Orinoquia (*Inia geoffrensis humboldtiana*) and Amazon (*Inia geoffrensis geoffrensis*). Across the distribution of the genus, geographic features such as rapids have been claimed as barriers separating natural populations generating vicariant events; it is possible that contrasting ecologies are reinforcing a differentiation, and promoting speciation. Up to date, there is no a comprehensive analysis on the ecological differentiation among basins inhabited by the two pink dolphin subspecies present in Colombian. In this work, we investigate the ecological differences between these two subspecies by the niche modeling. Models were built using the MaxEnt algorithm, through the integration of 8435 dolphin sights (*I. g. geoffrensis* N= 3592 and *I. g. humboldtiana* N= 4843), and 22 environmental variables derived from the Bioclim e Hydrosched datasets, and parameterized in the program R. Areas of high suitability for pink dolphins, released by our models, were congruent with previously proposed distribution for the two subspecies in Colombia and were strongly supported by the area under the curve metric (AUC 0,985). Our results suggest an ecological differentiation among the basins occupy by the two subspecies of pink dolphins. Globally, we conclude that external factors are part of the ecological differentiation between *I. geoffrensis* subspecies for the analyzed basins.

**Key words:** Pink dolphins, Modeling, MaxEnt, Climatic variables, Geographic Information Systems

## Introducción

El delfín rosado, tonina o bufeo, *Inia geoffrensis* es una especie endémica de Sur América y objeto de conservación (Lasso *et al.* 2010). Está distribuido ampliamente, habitando las cuencas del Orinoco, en Colombia y Venezuela, así como del Amazonas, en Brasil, Colombia, Ecuador, Perú, Guyana y Bolivia, cubriendo un área equivalente a siete millones de kilómetros cuadrados a través de ecosistemas contrastantes en sus condiciones ambientales (Best & Da Silva 1989a). A lo largo de su distribución se ha identificado que accidentes geológicos,

en particular los rápidos, actúan como barreras efectivas separando poblaciones naturales de delfines de río y promoviendo procesos de diferenciación entre poblaciones (Rice 1998). A la fecha, se reconocen dos subespecies de *Inia geoffrensis*, distribuidas en las cuencas del Orinoco (*I. g. humboldtiana*) y Amazonas (*I. g. geoffrensis*) con un sugerido aislamiento vicariante promovido por la formación del Canal del Casiquiare en la frontera ecológica entre la Orinoquia colombiana y el Amazonas venezolano (Da Silva & Martin 2000) (Figura 1). Aunque los delfines son mamíferos acuáticos obligados, variables ambientales externas a este medio, asociadas a las cuencas de los ríos



**Figura 1.** Distribución potencial sugerida por nuestros modelos para las subespecies de *Inia geoffrensis* en Sur América, derivados del algoritmo MaxEnt. Líneas gruesas: distribución potencial de las condiciones ambientales de las cuencas ocupadas por *I. g. geoffrensis* y líneas delgadas: distribución potencial de las condiciones ambientales de las cuencas ocupadas por *I. g. humboldtiana*.

que habitan, como la precipitación y la temperatura atmosférica, pueden ser aspectos determinantes en su ecología, afectando directa o indirectamente su ocurrencia en un área particular. Históricamente, se ha identificado la Orinoquía y la Amazonía como unidades biogeográficas y ecológicas diferenciadas, caracterizadas por condiciones climáticas contrastantes (McClain & Naiman 2008; Edmond *et al.* 1996), que de múltiples maneras afectan la dinámica hídrica de sus cuencas, determinando así la composición y estructura de la biota asociada al curso de sus ríos principales y afluentes. A pesar de la potencial influencia que las variables externas pueden tener sobre la biota acuática, a la fecha, no se cuenta con un análisis comprensivo sobre la diferenciación ecológica entre las cuencas habitadas por las subespecies de delfines rosados presentes en el territorio colombiano. Nuevas aproximaciones computacionales basadas en Sistemas de Información Geográfica (SIG), permiten en la actualidad caracterizar a una escala regional la disponibilidad de hábitat para las especies en un área determinada. A escala regional, condicionantes ecológicos como la elevación, la temperatura y la precipitación, en combinación con la

latitud, determinan entre otras la cobertura vegetal, que en consecuencia, y a una escala local, definen aspectos como la productividad, el flujo de nutrientes y la conductividad en los ecosistemas hídricos a las que están asociadas. A pesar de que la interrelación entre variables regionales y locales ha sido relativamente poco estudiada, su manejo a través de SIG abre una ventana de posibilidades para entender la distribución y ecología de organismos acuáticos como los delfines a nivel continental. En el presente estudio, avistamientos de delfines son integrados con información ambiental a través de herramientas de modelamiento de nicho con la finalidad de investigar las diferencias ecológicas de las cuencas habitadas por las subespecies de *I. geoffrensis* presentes en el territorio colombiano. Este trabajo cobra relevancia teniendo en cuenta la amplia extensión propuesta para los delfines rosados en Colombia a través de algunas de las regiones menos exploradas del territorio nacional, que en la actualidad se encuentran sometidas a diversos factores (expansión de la frontera agrícola, ganadería, aumento de los cultivos ilícitos, minería legal e ilegal y extracción de hidrocarburos), que comprometen su conservación.

## Materiales y métodos

### Obtención de datos de ocurrencia y variables climáticas

Con la finalidad de construir modelos de distribución potencial de las variables ambientales asociadas a las cuencas habitadas por las subespecies de delfines rosados presentes en el territorio nacional se utilizaron como insumos: 8.435 registros georreferenciados de avistamientos de delfines rosados del género *Inia* presentes en Colombia (Tabla 1, producto del Programa de Observadores de la Fundación Omacha), en combinación con 19 variables bioclimáticas (WorldClim [Hijmans *et al.* 2005], <http://www.worldclim.org/bioclim>), dos variables hidrológicas (Flujo de acumulación y dirección de los drenajes: Hydroshed [Lehner *et al.* 2008] <http://hydrosheds.cr.usgs.gov/index.php>) y un modelo de elevación digital (DEM). Todas las variables rasterizadas contaron con una resolución de 2.5 minutos (~ 5 Km<sup>2</sup> en el Ecuador) y fueron construidas a escala continental.

### Elección de variables y Modelamiento de nicho

Un proceso de selección de las variables más informativas para los datos de ocurrencia de las subespecies de delfines incluyó la aplicación de la función *vifstep* de la librería *usdm* en el Software estadístico R (R Development Core Team 2011, <http://www.R-project.org/>). De igual manera se evaluó la multicolinealidad entre las variables utilizadas.

La modelación se llevó a cabo mediante la aplicación del algoritmo MaxEnt (Maximun Entropy Modeling) (Phillips *et al.* 2006) con las variables elegidas previamente. Los datos de presencia se dividieron en dos conjuntos: *Training* (75% de los datos) usado para modelar la predicción del modelo y en *Testing* (25% de los datos) para realizar la validación del modelo (Fielding & Bell 1997; Guisan & Zimmermann 2000); además se utilizó un *background* de 10000 puntos para Sur América y se realizaron cinco réplicas.

En la construcción del modelo de distribución para *I. g. humboldtiana*, el algoritmo MaxEnt utilizó 818 datos de presencia, como puntos de entrenamiento, que fueron contrastados con 205 datos de presencia, usados como puntos de prueba; en tanto que para *I. g. geoffrensis* se modelaron 738 datos de presencia, como puntos de entrenamiento y 184 datos de presencia, usados como puntos de prueba.

El modelo resultante fue evaluado con la métrica de Área

**Tabla 1.** Avistamientos georreferenciados de los taxones reconocidos del género *Inia* para Colombia.

Taxones	Avistamientos georreferenciados
<i>Inia geoffrensis geoffrensis</i>	3.592
<i>Inia geoffrensis humboldtiana</i>	4.843
TOTAL	8.435

Bajo la Curva (AUC por sus siglas en inglés) que se considera actualmente como el método estándar para evaluar el rendimiento de los modelos predictivos de distribución; el resultado de este estadístico puede variar en un valor comprendido entre 0,5 y 1, donde 1 representa un valor diagnóstico perfecto y 0,5 es una prueba sin capacidad discriminativa diagnóstica (Swets 1996). El resultado de MaxEnt es un mapa continuo que contiene probabilidades que mide la idoneidad de las áreas modeladas. Para generar el mapa de predicción se asignó un umbral definido como máxima suma de especificidad más sensibilidad (McBride & Ebert 2000; Saseendran *et al.* 2002; Elmore *et al.* 2003), las probabilidades por encima del umbral tomaron el valor de 1 y las celdas que tenían un valor menor al del umbral tuvieron un valor de 0.

## Resultados y discusión

Los modelos generados mostraron un alto soporte con valores de AUC de 0,985 (*I. g. humboldtiana*) y 0,982 (*I. g. geoffrensis*). La Figura 2 incluye los modelos de distribución potencial generados para las subespecies del género *Inia* en el territorio colombiano.

### Modelos de distribución potencial

Según nuestros modelos, áreas de alta disponibilidad para *I. g. humboldtiana* en Colombia, se asocian a los sistemas de sabanas de la ecorregión de los Llanos Orientales, en lo correspondiente a los distritos: Complejo Vaupés, Selvas del Norte del Guaviare de la (provincia biogeográfica Guayanesa); y los distritos de Maipures, Sabanas Altas y Arauca - Apure (provincia biogeográfica Orinocense), en los departamentos de Arauca, Casanare, Vichada y Meta, propios de la zona transicional Orinoquía-Amazonía (IGAC 2012), teniendo como cuencas principales los ríos Guaviare, Meta y Orinoco. Para el caso de *I. g. geoffrensis*, el algoritmo arrojó un modelo de disponibilidad de hábitat con dos áreas disyuntas asociadas a los distritos Alto Putumayo, Florencia y Caguán (provincia biogeográfica Amazónica), en las cuencas de los ríos Alto Putumayo y Caquetá; y otra, sobrepuesta parcialmente a las áreas generadas para *I. g. humboldtiana*, asociadas a las Selvas del Norte del Guaviare (provincia biogeográfica Guayanesa) y Sabanas Altas (provincia biogeográfica Orinocense), en los departamentos de Putumayo y Caquetá (Figura 1, círculo punteado).

La mayoría de los ríos colombianos para los que se ha verificado la presencia de delfines del género *Inia*, corresponden a ríos de aguas blancas, producto de la disolución de elementos químicos como carbonato de calcio y magnesio provenientes de rocas sedimentarias de la cordillera de los Andes (Furch 1984; Weibezahn 1990, Depetris & Paolini 1991, Konhauser *et al.* 1994). Esta condición sugiere a la productividad como una variable

determinante en la ecología de los delfines rosados. Para las cuencas del norte de Sur América se ha documentado la existencia de un gradiente de productividad asociado a la cercanía de las mismas con el sistema montañoso andino. Las descargas de nutrientes de los ríos nacidos en los Andes sobre los piedemontes del sistema han resultado en selvas sustentadas sobre suelos más fértiles y capaces de soportar una mayor biomasa, que selvas al oriente del subcontinente en las que predominan los ríos de aguas negras, pobres en elementos disueltos (Roldán & Ramírez 2008).

Debido a lo anterior se sugiere que las ecologías de las subespecies de delfín rosado en Colombia están influenciadas por factores externos al medio acuático, claramente diferenciables en la geografía del oriente del país. Para Colombia se ha identificado los piedemontes andinos particularmente en los distritos biogeográficos Alto Putumayo, Florencia y Caguán, como áreas que soportan selvas de alta productividad con una fauna vertebrados diferenciable de aquella en los distritos Vaupés y Selvas del Norte del Guaviare de una afinidad principalmente Guayanesa. Los contextos eco-biogeográficos responsables de la estructuración de las comunidades ícticas determinan de manera directa la presencia de delfines rosados al ser considerados predadores tope de la cadena trófica (Guisan & Zimmermann 2000). Estos determinantes ecológicos pueden estar jugando un papel importante que refuerza la diferenciación vicariante generada por procesos geomorfológicos (rápidos) promoviendo un proceso de especiación entre las poblaciones de delfines.

#### Anotaciones finales

Cabe mencionar que las áreas con alta disponibilidad para las subespecies de delfines rosados en Colombia, obtenidas en este estudio a través de un procedimiento computacional fueron coincidentes con aquellas previamente sugeridas (IUCN 2014; Da Silva & Martín 2000, Emmons & Feer 1999; Rice 1998), demostrando la utilidad del modelamiento de nicho como una herramienta apropiada para identificar patrones de distribución de las especies acuáticas a nivel regional y el potencial papel que juegan variables ambientales atmosféricas en la selección de cuencas por parte de los delfines de río. Esto último es importante pues condicionantes ecológicos pueden estar reforzando procesos de especiación promovidos por eventos vicariantes asociados a accidentes geomorfológicos como los rápidos; al tiempo que nos permiten reconocer áreas con ecologías contrastantes dentro la extensa distribución de estas subespecies.

#### Agradecimientos

Este trabajo no hubiese sido posible sin la colaboración de

la Fundación Omacha en el marco del Programa de Conservación de Delfines de Río de Suramérica auspiciado por Whitley Found For Nature, Foundation Segre, WWF-Colombia y Nature Serve que facilitaron los registros de avistamientos de delfines rosados producto de su trabajo de campo en la última década, que fueron usados en la elaboración de nuestros análisis. Agradecemos a F. Trujillo y F. Mosquera-Guerra de la Fundación Omacha por la asistencia en la revisión de versiones preliminares de este manuscrito. A C. Sosa-Arango por el apoyo en los análisis estadísticos.

#### Literatura citada

- Best R.C. & V.M.F. Da Silva. (1989a). Biology, status and conservation of *Inia geoffrensis* in the Amazon: Limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin. H. Sioli (Ed). Cr W. Junk, Dordrecht, The Netherlands.
- Da Silva V. & A.R. Martin. (2000). The status of the boto or Amazon River dolphin *Inia geoffrensis* (de Blainville, 1817): a review of available information. Paper submitted at the meeting of the IWC Scientific Committee, 2000. IWC, Cambridge, UK.
- Depetris P.J. & J.E. Paolini. (1991). Biogeochemical aspects of South American rivers: the Paraná and the Orinoco. Pp. 105-125, en E. Degens, S. Kempe y J. E. Richey (eds.), Biogeochemistry of major world rivers. John Wiley & Sons, Great Britain.
- Edmond J.M., M.R. Palmer, C.I. Measures, E.T. Brown & Y. Huh. (1996). Fluvial geochemistry of the eastern slope of the northeastern Andes and its foredeep in the drainage of the Orinoco in Colombia and Venezuela. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60: 2949-2976.
- Elmore K.L., S.J. Weiss & P.C. Banacos. (2003). Operational ensemble cloud model forecasts. Some preliminary results. *Weather and Forecasting*, 18, 953-964.
- Emmons L. & F. Feer. (1999). Mamíferos de los bosques húmedos de América Tropical, una guía de campo. 1era edición en español. Editorial FAN. Santa Cruz de la Sierra.
- Fielding A.H. & J.F. Bell. (1997). A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation* 24: 38-49.
- Furch K. (1984). Water chemistry of the Amazon basin: The distribution of chemical elements among freshwaters. Pp. 167-199, En: Sioli H. (ed.) The Amazon. Limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin. Dr. W. Junk Publishers, Dordrecht, Boston, Lancaster. Netherlands.
- Guisan A. & N.E. Zimmermann. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling* 135: 147-186.
- Hijmans R.J., S.E. Cameron, J.L. Parra, P.G. Jones & A. Jarvis. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25: 1965-1978.
- IUCN. (2014). The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2014.3 Downloaded on 17 April 2015. [www.iucnredlist.org]
- IGAC. (2012). Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Regiones geográficas de Colombia [mapa]. 1:7500000. Consultado 18 de A b r i l d e 2 0 1 5 .

- [[http://geoportal.igac.gov.co/mapas\\_de\\_colombia/IGAC/Tematicos2012/RegionesGeograficas.pdf](http://geoportal.igac.gov.co/mapas_de_colombia/IGAC/Tematicos2012/RegionesGeograficas.pdf)]
- Konhauser K., W.S. Fyfe & B.I. Kronberg. (1994). Multi-element chemistry of some Amazonian waters and soils. *Chemical geology* 111: 155-175.
- Lasso C.A., J.S. Usma, F. Trujillo & A. Rial. (Eds) (2010). *Biodiversidad De La Cuenca del Orinoco: Bases científicas para la identificación de áreas prioritarias para la conservación y uso sostenible de la biodiversidad*. Instituto de investigación de recursos biológicos Alexander Von Humboldt, WWF Colombia, Fundación Omacha, Fundación La Salle e Instituto De Estudios De La Orinoquia (Universidad Nacional De Colombia). Bogotá, D. C., Colombia. 609 Pp.
- Lehner B., K. Verdin, A. Jarvis. (2008). New global hydrography derived from spaceborne elevation data. *Eos, Trans. Am. Geophys. Union* 89 (10), 93-94.
- McBride J.L. & E.E. Ebert. (2000) Verification of quantitative precipitation forecasts from operational numerical weather prediction models over Australia. *Weather and Forecasting*, 15, 103-121.
- McClain M.E. & R.J. Naiman. (2008). Andean Influences on the Biogeochemistry and Ecology of the Amazon River. *Oxford Journals. Oxford University Press. BioScience*, Vol. 58, No. 4, pp. 325-338.
- Phillips S.J., R.P. Anderson & R. E. Schapire. (2006). Maximum Entropy modelling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190:231-259.
- R Development Core Team. (2011). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0 [<http://www.R-project.org/>]
- Rice D.W. (1998) *Marine mammals of the world: systematics and distribution*. Society for Marine Mammalogy, Special Publication Number 4 (Wartzok D, ed.), Lawrence, KS. USA.
- Roldán P.G & R.J. Ramírez. (2008). *Fundamentos de Limnología Neotropical*. 2da Ed. Universidad de Antioquia.
- Saseendran S.A., S.V. Singh, L.S. Rathore & S. Das. (2002). Characterization of weekly cumulative rainfall forecasts over meteorological subdivisions of India using a GCM. *Weather and Forecasting*, 17, 832-844.
- Swets J.A. (1996). *Signal detection theory and ROC analysis in psychology and diagnostics: collected papers*.
- Weibezahn F. (1990). Hidroquímica y sólidos suspendidos en el alto y medio Orinoco Pp. 81-119, en F. Weibezahn, H. Alvarez y W. Lewis Jr. (eds.), *El río Orinoco como ecosistema*. Impresos Rubel, Caracas, Venezuela.