



Modelación dinámica del comportamiento hidrológico de un humedal urbano bajo condiciones del fenómeno ENSO

Dynamic modeling of the hydrological behavior of an urban wetland under conditions of ENSO phenomenon

Gisselle García-León¹; Julio Beltrán-Vargas²; Carlos Zafra-Mejía³

¹Ing. Ambiental, M.Sc. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D.C., Colombia; e-mail: leidygisselle315@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4488-5827>

²Biólogo Marino, M.Sc. Ph.D. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, D.C., Colombia; e-mail: jebeltran@udistrital.edu.co; <https://orcid.org/0000-0002-9397-7894>

³Ing. Civil, Ph.D. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Grupo de Investigación para el Desarrollo Sostenible - INDESOS. Bogotá, D.C., Colombia; e-mail: czafra@udistrital.edu.co; <https://orcid.org/0000-0002-4061-4897>

Cómo citar: García-León, G.; Beltrán-Vargas, J.; Zafra-Mejía, C. 2020. Modelación dinámica del comportamiento hidrológico de un humedal urbano bajo condiciones del fenómeno ENSO. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 23(2):e1750. <http://doi.org/10.31910/rudca.v23.n2.2020.1750>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

Recibido: Febrero 1 de 2020 **Aceptado:** Octubre 20 de 2020 **Editado por:** Ingeborg Zenner de Polanía

RESUMEN

El estado actual y las continuas alteraciones que aquejan a los humedales ubicados en la ciudad de Bogotá (Colombia), motiva el desarrollo de instrumentos y herramientas, que permitan explicar su comportamiento hidrológico bajo tensiones climáticas, como lo es el fenómeno ENSO. Este artículo presenta la formulación de un modelo de las condiciones hidrológicas del humedal urbano de Torca. La simulación, se realizó con el software Vensim® y la validación estadística del modelo, se efectuó mediante un análisis de sensibilidad multivariable (MVSS), a partir del método Montecarlo. Se evidenció que en los años de ocurrencia del fenómeno climatológico ENSO (2001) y (2011), el patrón de comportamiento de la precipitación y del flujo de entrada (Qi) de la cuenca aferente del humedal fueron paralelos. El tiempo hidráulico de retención (THR) sugirió un

comportamiento inverso con relación a la precipitación. En efecto, la precipitación promedio mensual fue de 47,8mm y 158,7mm y el THR promedio fue de 55 días y 33 días, para los años El Niño y La Niña, respectivamente. El flujo de entrada y de salida presentaron un comportamiento paralelo durante el período de estudio, debido, probablemente, a que el cuerpo de agua se convirtió en un cauce de salida. Durante El Niño, cuatro meses registraron desbordamiento del humedal (junio, septiembre, octubre y diciembre), con volúmenes de agua superiores a 130.645m³. Durante La Niña, todos los meses registraron desbordamiento del humedal, a excepción de agosto y septiembre, en donde se observaron volúmenes de agua de 100.018m³ y 109.166m³, respectivamente.

Palabras clave: Fenómeno ENSO; Hidrología; Humedal; Modelación dinámica; Tiempo hidráulico de retención.

ABSTRACT

The current state and the continuous changes that affect the wetlands located in the city of Bogotá (Colombia), motivates the development of instruments and tools that illustrate their hydrological behavior under climatic stresses such as the ENSO phenomenon. This article presents the formulation of a model of the hydrological conditions of the urban wetland of Torca. The simulation was carried out with the Vensim® software and the statistical validation of the model was carried out by means of a multivariate sensitivity analysis (MVSS) using the Montecarlo method. It was evidenced that in the years of occurrence of the ENSO climatological phenomenon (2001) and (2011), the behavior pattern of precipitation and inflow (Qi) of the afferent basin of the wetland were parallel. Hydraulic retention time (THR) suggested an inverse behavior in relation to precipitation. Indeed, the average monthly rainfall was 47,8mm and 158,7mm, and the average THR was 55 days and 33 days for the El Niño and La Niña years, respectively. The inflow and outflow presented a parallel behavior during the study period, probably due to the fact that the body of water became an outlet channel. During El Niño, the wetland overflowed for four months (June, September, October and December), with volumes exceeding 130,645m³. During La Niña, the wetland overflowed every month; except for August and September, where volumes of 100.018m³ and 109.166m³ were observed, respectively.

Keywords: ENSO phenomenon; Hydrology; Wetland; Dynamic modeling; Hydraulic retention time.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo urbano, a nivel mundial, favoreció un escenario adverso para la conservación de humedales localizados en los perímetros urbanos (Díaz & Hernández, 2015). En Bogotá (Colombia), el vertimiento de residuos sólidos y líquidos, el pastoreo, la escorrentía y, en general, el desarrollo de actividades humanas asociadas a la productividad ha provocado un deterioro significativo en dichos ecosistemas (Cardona *et al.* 2012). Al respecto, la hidrología fue el factor principal que determinó la funcionalidad de los humedales. Las características del hidro-período establecieron las diferencias entre los diversos tipos de humedales existentes y afectaron la composición de especies, la estructura del suelo y los procesos metabólicos y abrió el ecosistema a entradas y salidas laterales de materiales (Moreno, 2012).

La dinámica hidrológica de los humedales, se ha visto influenciada por factores naturales y por el resultado de actividades antrópicas. Debido a que los humedales están profundamente ligados a cuencas aferentes, los convierte en receptores de flujos de agua, nutrientes y contaminación. Lo anterior, hace que los humedales sean en extremo vulnerables a manejos inadecuados, que afectan la hidrología de los mismos (Moreno, 2012). Es por esto, que modelar escenarios en torno al comportamiento hidrológico de los humedales toma mayor significancia, toda vez que la modificación del mismo, por acciones antrópicas, implica afectaciones al comportamiento biótico

del sistema y a las poblaciones humanas, asentadas en las zonas de impacto.

El humedal de estudio (Torca, Colombia), se encuentra amenazado por vertimientos ilegales, en donde se observa, en sus zonas de ronda, la presencia de vertidos de residuos sólidos; igualmente, se aprecian usos no compatibles, como son el pastoreo de reses y equinos y urbanización (López Barrera *et al.* 2015). En este sentido, el humedal presenta, probablemente, una fuerte tendencia a la eutrofización, deterioro de sus condiciones hidrológicas y ocurrencia de inundaciones, en tiempos de lluvia, provocando bloqueos en los corredores viales aledaños (EAAB-ESP, 2014); de esta manera, la anterior problemática sustenta el desarrollo del presente estudio. Adicionalmente, esta investigación adquiere relevancia, debido a que el humedal es un componente estratégico de la estructura ecológica de la ciudad (López Barrera *et al.* 2015).

El sistema de humedales de Bogotá, se redujo drásticamente y, en la actualidad, posee una extensión entre 800-1.500 hectáreas (AMB, 2000), es decir, solo se conserva entre el 2-3% de los mismos (Moreno *et al.* 2005). De esta manera, es significativo contar con un ecosistema de estudio que sirva como referente en los próximos programas de monitoreo y recuperación de humedales. En las condiciones señaladas, la simulación dinámica permite esbozar un problema y probar con él, convirtiéndose en una herramienta de observación, de estudio, de contraste y de pronóstico del comportamiento, de un sistema ante posibles alternativas de solución, que conduzcan a la opción más viable, en medio de diversos criterios y con un tiempo de respuesta moderado (Puche *et al.* 2016).

López *et al.* (2006) definen el hidro-período, como el comportamiento temporal de fluctuaciones del volumen de agua del sistema, resultante del recuento de agua entrante, saliente y la contenida en la cubeta de inundación. Dicha variable permite estimar la cantidad de agua para un período específico, así como el comportamiento del sistema en épocas húmedas y secas.

A nivel internacional, se destacan cuatro factores principales para explicar el comportamiento hidrológico: fuente de agua, forma de evacuación, hidro-período y tasa de renovación; más dos factores suplementarios: hidroquímica e hidrodinámica (Montes del Olmo *et al.* 2002). Duque Yaguache & Vásquez Zamrano (2015) utilizan también el código Water Evaluation And Planning System - WEAP, que se basa en la representación del ciclo de precipitación-escorrentía. A nivel nacional, se han empleado metodologías, a partir del balance de masas, en donde se ha modelado el hidro-período, a partir de un modelo dinámico de simulación, para explicar el comportamiento hidrológico mensual del cuerpo de agua (Beltrán & Rangel, 2013). También, se han implementado modelos, que toman como base la relación lluvia-escorrentía (Molina *et al.* 2007).

El propósito del modelo que se presenta es explicar el comportamiento hidrológico de un humedal urbano, mediante modelación dinámica, bajo condiciones del fenómeno ENSO. El estudio, se desarrolla durante el período comprendido entre

1970-2014, tomando como referentes los años asociados con las variaciones climáticas extremas El Niño (2001) y La Niña (2011). Se analiza, también, el comportamiento de la lluvia y el flujo de entrada de la cuenca del humedal, el tiempo hidráulico de retención y el desbordamiento del cuerpo de agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del lugar de estudio. El humedal Torca, se localiza al norte de Bogotá (Colombia), a la altura de la Autopista Norte con calle 220, en medio de las localidades de Suba y Usaqué. Cuenta con una lámina de agua de 0,9ha, aproximadamente, el cual, es abastecido por las quebradas Aguas Calientes, Patiño y San Juan (Figura 1). Este humedal presenta la posibilidad de conectividad ecológica con el humedal Guaymaral. Adicionalmente, resalta por su importancia hidrogeológica, al encontrarse cercano a la formación Sabana, compuesta por arenas, que resultan en la formación de acuíferos de porosidad primaria y que son hábitat de especies de aves en peligro de extinción (Díaz & Hernández, 2015).

Metodología de modelación. La simulación, se efectuó con el software Vensim®, que se utiliza como instrumento de modelación para esquematizar, modelar, registrar, estudiar y mejorar simulaciones, basadas en teoría de sistemas (Peña Escobar *et al.* 2014). Para la validación estadística del modelo, se utilizó el análisis de sensibilidad

multivariable (MVSS), aplicando el método Montecarlo (herramienta de Vensim®), el cual, trabaja probando un conjunto de números dentro de un cierto rango y, empleando un análisis multivariable, hace una muestra aleatoria de valores de la distribución para cada elemento especificado y los valores obtenidos son el resultado de una simulación (García, 2007). La relación entre variables, se efectuó con un análisis de correlación. La tabla 1 muestra las variables y datos utilizados para el desarrollo del modelo.

Sistematización del modelo. Los algoritmos empleados para estimar los caudales aferentes y eferentes a partir de la teoría del balance de masas (Ecuación 1, 2, 3 y 4), el cálculo de las pérdidas de agua en el humedal por evapotranspiración (Ecuación 5), la estimación del THR (Ecuación 6) y la descarga de agua de la cuenca aportante (Ecuación 7), se basaron en el referente metodológico Beltrán & Rangel (2013).

Las ecuaciones que contempla este modelo, se listan a continuación. La ecuación 1 representa la tasa de cambio del volumen de agua en el humedal:

$$\frac{dv(t)}{dt} = Q_i(t) - Q_s(t) \tag{ecuación 1}$$

Donde, v es el volumen de agua en el humedal (m^3), Q_i es el flujo de entrada de agua (m^3/mes), y Q_s el flujo de salida de agua (m^3/mes).

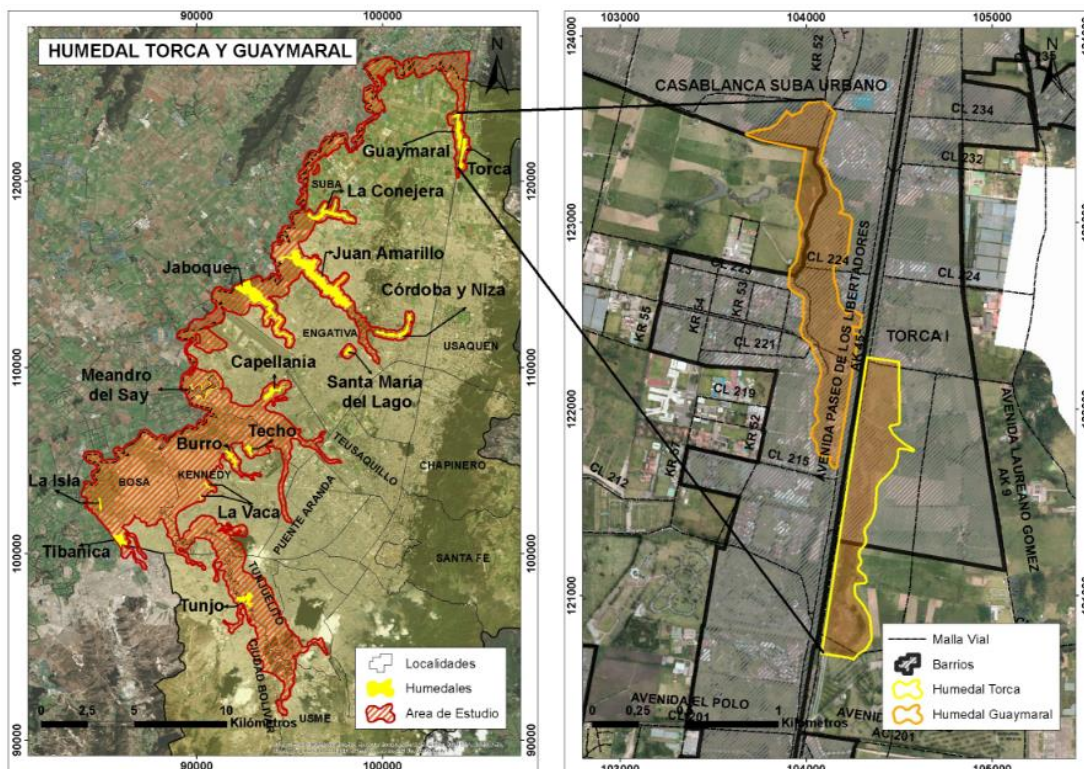


Figura 1. Zonificación del humedal de Torca – Bogotá (Colombia). Fuente: Secretaría Distrital de Ambiente, SDA (2018).

Tabla 1. Variables e índices del modelo.

PARÁMETROS	VALORES Y UNIDADES	FUENTE
Área del humedal (Ecuación 2, 4 y 5)	302.700m ² (30,27ha)	López Barrera <i>et al.</i> 2015
Área de la cuenca aferente (ADA) (Ecuación 2, 4 y 7)	5.037.400m ² (503,74ha)	Conservación Internacional Colombia, 2014; López Barrera <i>et al.</i> 2015
Capacidad máxima de almacenamiento del humedal	127.000m ³ /año	EAAB-ESP, 1997
Escorrentía (Ecuación 7)	0,01m ³ /km ²	Helmens & van der Hammen, 1995
Factor de corrección (Ecuación 5)	0,001 (10 ⁻³)	Beltrán & Rangel, 2013
Profundidad del humedal	1,37m	EAAB-ESP, 1997
Temperatura media mensual (Ecuación 5)	13,1°C	JBICM, 2016
Volumen inicial de agua en el humedal (Ecuación 3)	59.038m ³	Cálculo a partir de datos de CAR, 2006. Estimación
VARIABLES	VALORES Y UNIDADES	FUENTE
Flujo de entrada (Qi) cuenca aferente Humedal de Torca (CAHT) (Ecuación 1 y 7)	m ³ /mes	Cálculo a partir de datos de la CAR, 2017. Modelación
Evapotranspiración (ET) (Ecuación 3)	mm/mes	Cálculo a partir de datos de IDEAUN y EAAB-ESP, 2012. Estimación
Flujo de salida (Qs) al humedal Guaymaral (Ecuación 1, 3 y 6)	m ³ /mes	Modelación
Precipitación 1970-2014 (Ecuación 2, 4 y 7)	mm/mes	CAR, 2017
Precipitación efectiva promedio anual (Ecuación 2 y 4)	mm/mes	Cálculo a partir de datos de la CAR, 2017. Estimación
Tiempo hidráulico de retención (THR) (Ecuación 6)	días/año	Modelación
Volumen humedal de Torca (Ecuación 1 y 6)	m ³ /mes	Modelación

Fuente: Beltrán & Rangel (2013).

La ecuación 2 computa flujo de entrada de agua:

$$Q_i(t) = P(t) + Si(t) \quad \text{ecuación 2}$$

Donde, Si(t) es el caudal mensual promedio (m³/mes) y P(t) es la precipitación media mensual o precipitación efectiva mensual promedio (mm/mes).

La ecuación 3 computa el flujo de salida de agua:

$$Q_s(t) = So(t) + Et(t) \quad \text{ecuación 3}$$

Donde, So(t) es el caudal promedio salida (m³/mes) y Et(t) la evapotranspiración mensual (mm/mes).

La ecuación 4 computa el caudal mensual promedio:

$$Si(t) = Si(t)QAC + Si(t)QP + Si(t)QSJ \quad \text{ecuación 4}$$

Donde, Si(t) es el caudal mensual promedio (m³/mes), QAC la Quebrada Aguas Calientes (m³/mes), QP la Quebrada Patiño (m³/mes) y QSJ la Quebrada San Juan (m³/mes).

La ecuación 5 computa la evapotranspiración:

$$ET = K_e * ETF * SA \quad \text{ecuación 5}$$

Donde, K_e es la constante de evapotranspiración (mm/mes*m²), ETF el factor de corrección y SA la superficie de la sección (m²).

La ecuación 6 computa el tiempo hidráulico de retención – THR:

$$THR = \frac{V}{Q} \quad \text{ecuación 6}$$

Donde, V es el volumen de agua en el humedal (m³) y Q el caudal promedio mensual (m³/mes).

La ecuación 7 computa el submodelo de descarga:

$$Q_i = ADA * P * 0.01 * 60 * 24 * 365 \quad \text{ecuación 7}$$

Donde, Qi es el caudal de la cuenca aferente (m³/mes), ADA el área de la cuenca aferente (km²), P la precipitación media anual (mm) y E la escorrentía (0,01m³/km²). Los números 60*60*24*365 hacen referencia al factor de conversión de segundos, minutos, horas, días, respectivamente.

La precipitación media mensual, se tomó de la estación hidrometeorológica Torca código 2120077, de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR, reportados por medio del Sistema de Información Climatológica e Hidrológica - SICLICA, en el período comprendido entre 1970-2014. La estación, se localiza en Bogotá, bajo la categoría de *Pluviométrica* (PM), a una

altura de 2.579m s.n.m., fecha de instalación de 1960 y coordenadas 1.005.320E y 1.021.800N.

Supuestos del modelo. Los siguientes supuestos permitieron simplificar y analizar el modelo (Beltrán & Rangel, 2013): (i) Para efectos del cálculo del volumen de agua que ingresa al humedal $Q_i(t)$, se consideran dos factores: el S_iQ_x de la cuenca aportante y la $P(t)$ precipitación efectiva en cada uno de los tributarios. (ii) El modelo no contempla los efectos generados por las corrientes del viento. (iii) El humedal de Torca fue diseñado para actuar como lago de amortiguamiento; por esta razón, el modelo no contempla los planos de desborde del humedal, puesto que este fue adecuado para funcionar como un sistema hidrológico de volumen controlado. (iv) De acuerdo con la formación geológica de la zona de estudio, que posee amplios niveles de arcillas de origen lacustre (Helmens & van der Hammen, 1995), el modelo asume que no existen flujos de agua provenientes de acuíferos que alimenten el humedal y que la infiltración es mínima.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Precipitación y flujo de entrada. Los años con mayor precipitación fueron 1971, 1972, 1975, 1976, 1981 y 2011, con una precipitación total anual, que osciló entre 1.753mm/año y 1.904mm/año y con Q_i flujos de entrada de la cuenca aferente, entre 2.324.837m³/año y 2.524.505m³/año. Los años con menor precipitación fueron 1992, 1994, 1995, 1997 y 2001, durante los cuales, la precipitación total anual varió entre 573mm/año y 794mm/año y los flujos de entrada al humedal fluctuaron entre 760.096m³/año y 1.053.633m³/año. La precipitación promedio durante el período comprendido entre 1970-2014 fue de 1.194mm/año y el promedio del Q_i de la cuenca aferente fue de 1.598.596m³/año. La figura 2 muestra el esquema de Forrester, diseñado para el desarrollo del modelo hidrológico del humedal de Torca.

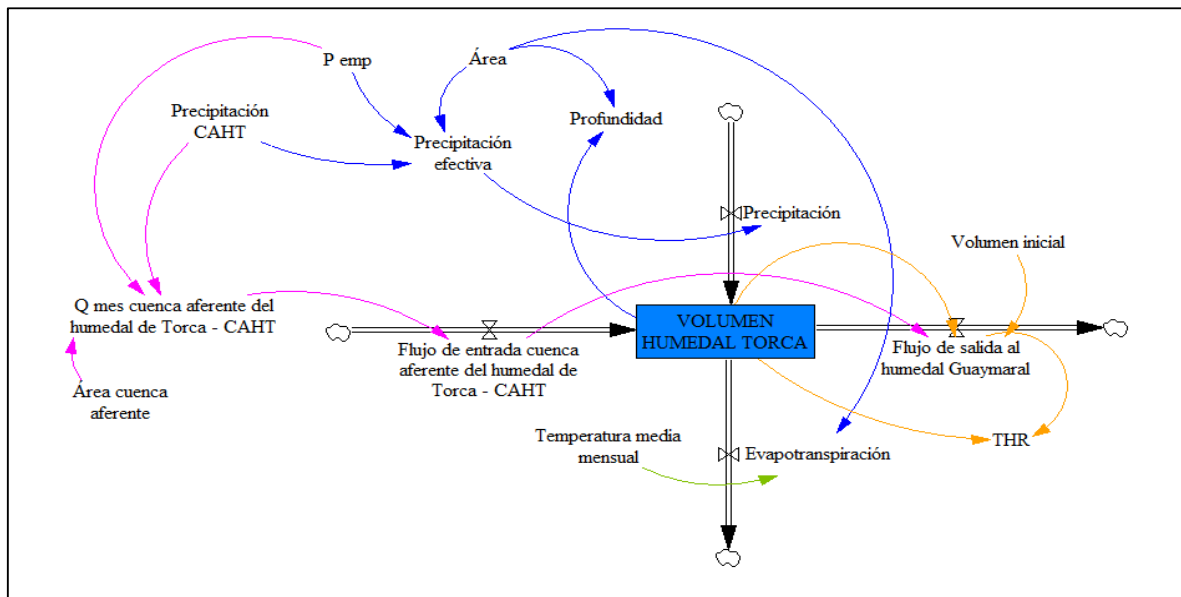


Figura 2. Diagrama de Forrester – Modelación dinámica del comportamiento hidrológico del humedal de Torca. Fuente: Beltrán & Rangel (2013).

Se evidenció que las oscilaciones en el Q_i que ingresa al humedal procedente de la cuenca aferente, se comportan de acuerdo con la precipitación, al registrar las cifras más altas de pluviosidad, se dieron de igual forma los valores más altos de Q_i y el mismo patrón, se generó para los valores menores. Se realizó el análisis de regresión entre las variables mencionadas; Precipitación de la cuenca aferente del humedal de Torca - CAHT y Q_i de la cuenca aferente del humedal de Torca - CAHT, obteniendo, como resultado, una correlación directa positiva (r -Pearson = 0,929), clasificado como Muy fuerte (Pimienta, 2016). Correa *et al.* (2011) refieren que las variaciones de la cota de agua en cuerpos de aguas estacionales y continuos son

producto de la relación entre dinámicas hidrológicas, geológicas y biológicas, entre ellas, la precipitación, la infiltración, la evaporación y la evapotranspiración, así como del abastecimiento de acuíferos y aportes de corrientes de agua superficial. Franco Vidal *et al.* (2013) indican también que en los Andes, la complejidad del relieve da como resultado múltiples regímenes mesoclimáticos, ocasionando que los ecosistemas de humedal y sus cuencas aportantes, se vean influenciados por diversos comportamientos hidrológicos.

Influencia del fenómeno ENSO. Durante los últimos 44 años de la serie de datos, el 2001 obtuvo el valor más bajo de precipitación total

anual, con 573mm/año y un Qi de la cuenca aferente de 760.096m³/año. En el mismo período, el 2011 alcanzó el registro de mayor nivel, con 1904mm/año y un Qi de la cuenca aferente de 2.524.505m³/año. Dicha variación interanual fue corroborada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM (2012), donde hace referencia a eventos atípicos de períodos bajos de lluvias o secos y períodos altos de pluviosidad.

En el año de El Niño, se evidenció que el patrón de comportamiento de la precipitación y del Qi era paralelo. Durante el año, solo se presentaron cuatro meses con porcentajes significativos de precipitación, siendo febrero (53,9mm), mayo (58,2mm), septiembre (75,9mm) y noviembre (80,6mm), los de mayor representatividad. En el año de La Niña, la secuencia de los datos también fue paralela en las dos variables y los meses donde ocurrieron precipitaciones de mayor intensidad fueron marzo (185,4mm), abril (184mm), mayo (175mm), octubre (193,9mm) y noviembre (473,5mm); dichos comportamientos indicaron que el Qi CAHT está en función de la precipitación. Poveda *et al.* (2011) refieren que el patrón de comportamiento de la precipitación, aunado con el fenómeno del Niño y La Niña afectan la dinámica de los ecosistemas de humedal. Pabón Caicedo (2011) indica que cuando las condiciones extremas del fenómeno ENSO concuerdan con las variaciones del comportamiento climático normal, se genera mayor tensión e incidencia en el ecosistema acuático.

Al comparar los resultados de los años analizados, se infirió que el Qi aumentó, aproximadamente, un 58% con relación a la serie histórica de datos durante el fenómeno de La Niña y un 147%, en relación al fenómeno de El Niño. Dichos resultados son relevantes, ya que los cambios climáticos inciden de manera directa en la biodiversidad del ecosistema (Franco Vidal *et al.* 2013).

Tiempo hidráulico de retención. El THR promedio para el período comprendido entre 1991-2011 fue de 46días/año, con una precipitación media multianual de 86,8mm, es decir, que el humedal renovó su volumen ocho veces. La figura 3 presenta la modelación para la precipitación y el THR bajo condiciones del fenómeno ENSO. En el 2001, las precipitaciones más altas se registraron en septiembre y noviembre, con valores de 75,9 y 80,6mm y THR de 27días/año y 23días/año, respectivamente, mientras que los reportes más bajos de lluvia, se presentaron durante enero y marzo, con cifras de 20,4 y 30,7mm, con THR de 65días/año y 62días/año, respectivamente. En el 2011, las lluvias de mayor intensidad se dieron en octubre y noviembre, con valores de 193,9 y 473,5mm y THR de 19días/año y 11días/año, respectivamente, a diferencia de julio y agosto, meses con bajas mediciones de pluviosidad, que registraron 33,9 y 40,8mm, con THR de 60días/año y 39días/año, respectivamente.

De acuerdo con lo anterior, el patrón de comportamiento observado entre la precipitación y el THR es inversamente proporcional, a mayores niveles de precipitación, los tiempos hidráulicos de retención fueron menores y a pluviosidades bajas, los tiempos de retención aumentaron significativamente. El análisis de regresión entre las variables mencionadas, Precipitación CAHT y THR generó,

como resultado, una correlación inversa positiva para los dos años analizados, con coeficientes r-Pearson de 0,911 y 0,729, clasificados como Muy fuerte y Fuerte, para 2001 y 2011, respectivamente (Pimienta, 2016). Durante el 2011, se generó una menor correlación entre las variables mencionadas en comparación con el 2001, comportamiento que se puede atribuir a las fuertes oscilaciones pluviales durante el año de ocurrencia de La Niña, propiciando que el THR variara de igual forma y se perdiera uniformidad en el comportamiento de las mismas.

Al respecto, Reyes-Lara & Reyes-Mazzoco (2009) indican que cuando la carga hidráulica aumenta, el tiempo de residencia del agua se ve reducido para enfrentar dicho aumento. Para Alasino *et al.* (2015), la precipitación afecta los humedales de forma favorable y desfavorable: la primera, porque disminuye la concentración de contaminantes o nutrientes por efectos de dilución y, la segunda, porque promueve la disminución del tiempo de residencia del agua y, por ende, impide el desarrollo o el restablecimiento de los ciclos biogeoquímicos en el ecosistema acuático. Jørgensen (2003) indica que una reducción en el THR, por efectos del aumento en la precipitación, produce un mayor desplazamiento de agua en el humedal lavando una cantidad parcial de nutrientes. De acuerdo con Beltrán & Rangel (2013), el THR faculta disminuir el impacto de la contaminación en el cuerpo de agua.

Flujo de salida al humedal Guaymaral. El humedal de Torca funciona como lago de amortiguamiento (IDEAUN & EAAB-ESP, 2012). La figura 3 presenta la modelación del Qi CAHT, Volumen del humedal de Torca y Qs al humedal Guaymaral, para los dos años objeto de estudio.

Se observó una secuencia paralela entre el Qi y el Qs, lo que se puede atribuir a que el humedal se transforma en un cauce de salida para el agua, debido a la relación mencionada entre la precipitación y el THR, es decir, a medida que ingresa un determinado volumen de agua y el THR es corto, dicho volumen tiende a salir del humedal simultáneamente. Beltrán & Rangel (2013) corroboran dicha relación para el humedal de Jaboque.

La variable Volumen humedal Torca sugirió un comportamiento paralelo a las otras dos variables; sin embargo, al observar con detalle en varios puntos de las curvas, se evidencia que el comportamiento es inverso, patrón atribuido a las variaciones en los flujos de entrada y salida. Cuando estos disminuyen, el humedal alcanza a almacenar una mayor cantidad de agua. En el 2001, dicho comportamiento fue más perceptible, debido a que el THR era mayor que en el 2011, donde la intensidad de las lluvias hizo que el humedal recambiara su volumen más rápidamente.

Con el fin de correlacionar las variables Qi de la cuenca aferente del humedal de Torca – CAHT, Volumen humedal Torca y Qs al humedal Guaymaral, se realizó el análisis de regresión múltiple para los años de ocurrencia del fenómeno de El Niño y La Niña. El 2001, obtuvo un coeficiente de correlación r-Pearson de 0,800 y el 2011, de 0,951. En los dos períodos analizados, la correlación fue positiva y con estimación muy fuerte (Pimienta,

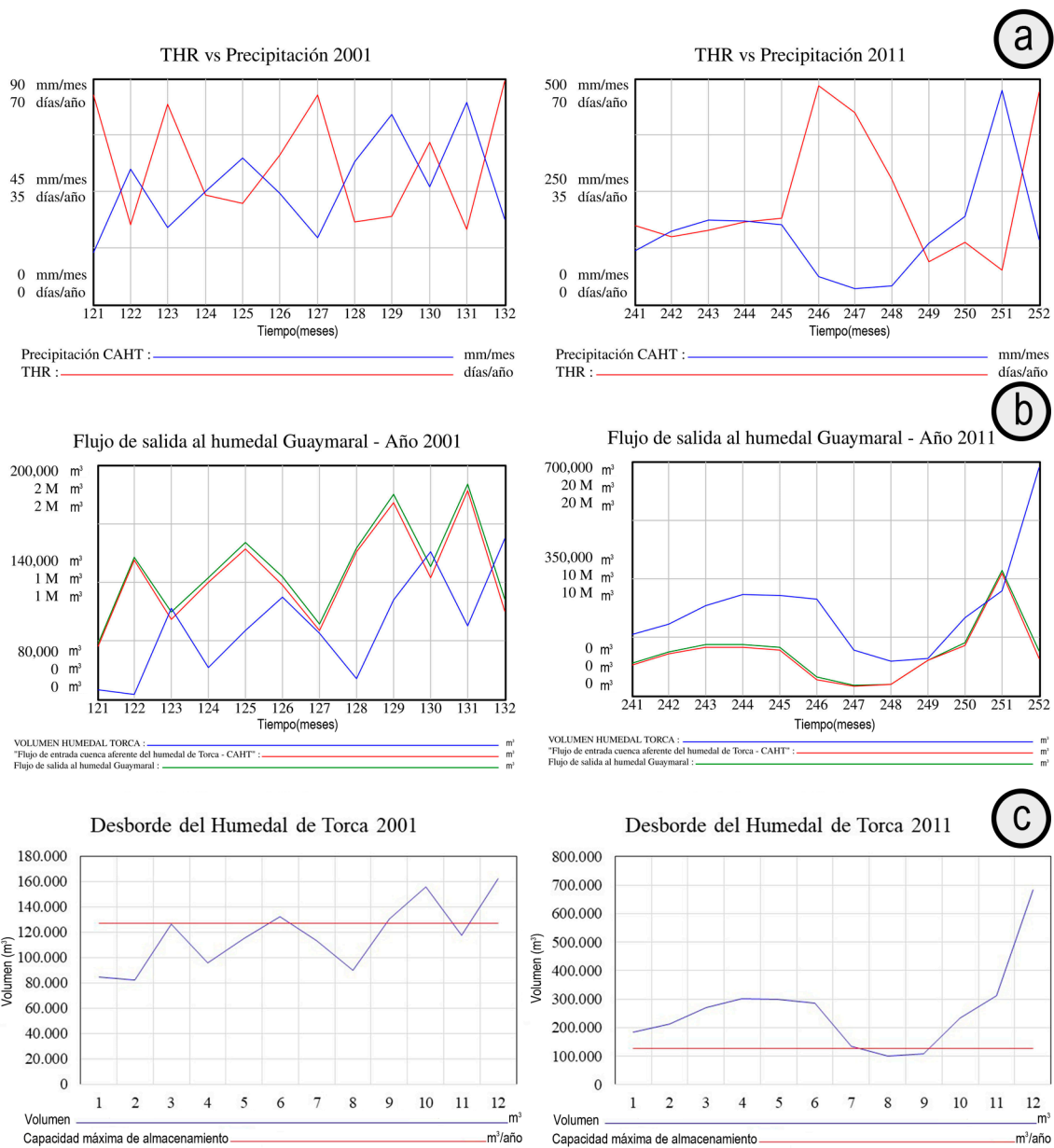


Figura 3. Modelación del: a. THR y precipitación; b. flujo de salida al humedal Guaymaral; c. desbordamiento del Humedal de Torca, año 2001 El Niño y 2011 La Niña.

2016). Van der Hammen *et al.* (2008) indican que los procesos hidrológicos presentan un comportamiento espacial y temporal. En los ecosistemas de humedal, la hidrología está definida por la conexión entre el flujo de entrada, el de salida y la capacidad de almacenamiento de la cubeta de agua, además de la dinámica misma del sistema acuático, como las oscilaciones temporales de los caudales, la elevación del agua y el hidro-período.

Desbordamiento del humedal. El humedal de Torca, se encuentra constituido por 0,25m de lodos sedimentados, que equivale a 1.100m³ de volumen y un relleno antrópico de 1,0m, que corresponde a 115.000m³, compuesto por materiales heterogéneos, como desechos

de materiales de construcción. La capacidad de embalse o capacidad máxima de almacenamiento es de 127.000m³/año (EAAB-ESP, 1997). Los datos anteriores fueron relevantes para la construcción grafica del perfil del humedal, con el fin de correlacionar la capacidad máxima de almacenamiento del mismo y el volumen anual de agua que recibe, variables requeridas para conocer las condiciones en que el humedal de Torca presentó el desbordamiento de sus aguas. La figura 3 presenta el desbordamiento del humedal bajo condiciones del fenómeno ENSO (2001- El Niño y 2011- La Niña).

En el 2001, en cuatro meses, se registró el desbordamiento del humedal (junio, septiembre, octubre y diciembre), con volúmenes

superiores a 130.645m^3 . En el 2011, todos los meses registraron el desbordamiento del humedal, a excepción de agosto y septiembre, con volúmenes de 100.018 y 109.166m^3 , respectivamente. Rivera Rondón *et al.* (2010) refieren que la secuencia de cambios hidrológicos en un humedal empieza durante la temporada de lluvias, con el aumento en la cantidad de agua y el rebose de las áreas de inundación; sin embargo, en época de aguas bajas, el caudal y la profundidad del sistema disminuyen y la superficie de inundación se reduce hasta la mitad, por efectos de la evaporación.

Simulación de sensibilidad multivariable – MVSS. El modelo, se simuló y luego se realizaron 200 simulaciones adicionales, mientras cambiaban automáticamente las variables independientes Área y Volumen inicial. La simulación contiene el comportamiento estándar para todas las variables, con los valores de las constantes originales del modelo y un rango de valores para las variables THR y Volumen Humedal Torca. Para efectos del modelo, se utilizó la Distribución Uniforme Aleatoria.

En la figura 4, se presenta el resultado del análisis de sensibilidad para el modelo, a partir de las variables definidas. En las gráficas de trayectorias individuales, se observan la representación de las 200 trayectorias simuladas y en las gráficas de sensibilidad por percentiles, los límites de confianza que se generan cuando las variables se modifican al azar alrededor de la distribución estadística,

permitiendo inferir que la sensibilidad del modelo es óptima, debido a que la mayoría de los datos se encuentran distribuidos en la media, que corresponde al 50%, es decir, que se obtiene una simulación precisa en el periodo de tiempo evaluado y se comprueba la funcionalidad del modelo. García (2007) indica que los límites de confianza permiten conocer la probabilidad de acertar en el análisis. Cuando la mayor parte de los datos simulados se ubican en el rango de menor porcentaje, se obtiene una predicción más centrada y precisa.

En conclusión, el patrón de comportamiento entre la precipitación y el THR es inversamente proporcional, es decir, a mayores niveles de precipitación, los THR son menores y, a pluviosidades bajas, los THR aumentan significativamente. Los resultados de los años analizados indican que el Qi aumentó, aproximadamente, un 58%, con relación a la serie histórica de datos durante el fenómeno de La Niña y un 147%, en relación a El Niño.

El Qi y el Qs presentaron un comportamiento paralelo, debido a que el humedal se transforma en un cauce de salida; a medida que ingresa un determinado volumen de agua y el THR es corto, dicho volumen tiende a salir del humedal simultáneamente. Cuando los niveles de pluviosidad y caudal disminuyeron, el humedal alcanzó a almacenar una mayor cantidad de agua.

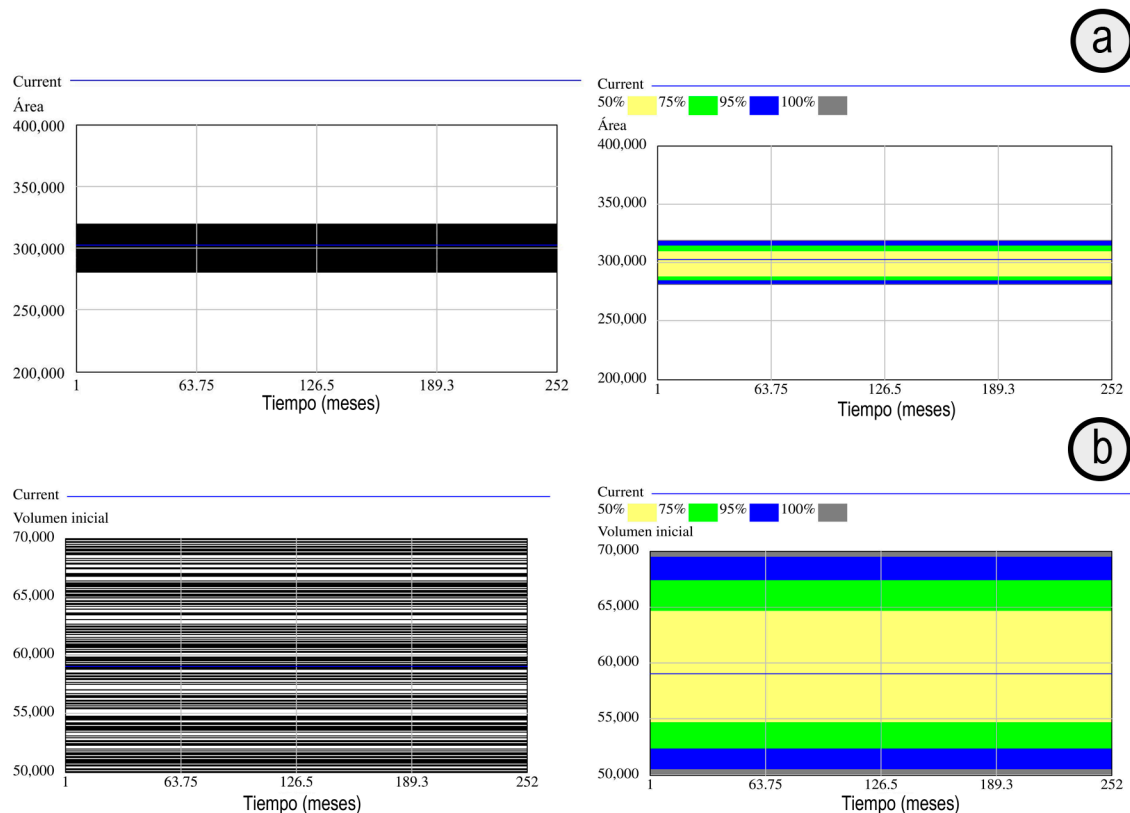


Figura 4. Análisis de sensibilidad multivariable: a. variable Área; b. variable Volumen inicial.

Las variables capacidad máxima de almacenamiento y volumen anual de agua que recibe el humedal son necesarias, para conocer las condiciones en que se presenta el desbordamiento de sus aguas. Se requiere conocer la composición y el volumen de cada uno de los elementos y materiales que conforman la cubeta del humedal. En el 2001, únicamente en cuatro meses, se registró el desbordamiento del humedal (junio, septiembre, octubre y diciembre), con volúmenes superiores a 130.645m^3 . En el 2011, todos los meses registraron el desbordamiento del humedal, a excepción de agosto y septiembre, con volúmenes de 100.018m^3 y 109.166m^3 , respectivamente.

Finalmente, está investigación es útil para las instituciones y organismos ambientales, ya que se constituye en un referente para los próximos programas de monitoreo y recuperación de humedales de Bogotá (Colombia), además se convierte en una herramienta para reestructurar la política nacional de humedales urbanos y la política nacional, para la gestión integral del recurso hídrico.

Agradecimientos: Los autores agradecen el apoyo logístico del grupo de investigación para el Desarrollo Sostenible de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (INDESOS) y a la Empresa de Acueducto, Agua y Alcantarillado de Bogotá. **Conflicto de intereses:** El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

REFERENCIAS

1. ALASINO, N.; NADAL, F.; PRIMO, L.; BOLLO, P.; LARROSA, N. 2015. Comportamiento cinético e hidráulico de un humedal construido a escala real. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 6(3):93-104.
2. ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ, AMB. 2000. Historia de los humedales de Bogotá.
3. BELTRÁN, J.; RANGEL, O. 2013. Modelación hidrológica del humedal de Jaboque – Bogotá, D.C. (Colombia). *Caldasia*. 35(1):81-101.
4. CARDONA, W.; CANO, T.; GIL, R.; GÓMEZ, D. 2012. Caracterización de fauna (ranas y aves) y flora en seis humedales del departamento de Risaralda. Convenio No. 453. Corporación Autónoma Regional de Risaralda – Carder y Wildlife Conservation Society (Wcs – Programa Colombia).
5. CONSERVACIÓN INTERNACIONAL COLOMBIA, CIC. 2014. Convenio de asociación No 01-201 del 2013.
6. CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA, CAR. 2006. Contrato de consultoría 755 de 2005. Actualización y complementación de los estudios técnicos existentes como soporte para la declaratoria de la Reserva Forestal Regional del Norte.
7. CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA, CAR. 2017. Ejes temáticos. Comportamiento del clima y cambio climático. Centro de monitoreo hidrológico y del clima. Información hidrometeorológica mensual.
8. CORREA, F.; URRUTIA, J.; FIGUEROA, R. 2011. Estado del conocimiento y principales amenazas de los humedales boscosos de agua dulce de Chile. *Rev. Chilena de Historia Natural*. 84:325-340.
9. DÍAZ, A.; HERNÁNDEZ, S. 2015. Análisis del Plan de Acción del humedal Torca, con base en la evaluación ambiental estratégica. *Rev. Facultad de Ingeniería*. 24(38):9-19.
10. DUQUE YAGUACHE, L.F.; VÁSQUEZ ZAMRANO, R.F. 2015. Modelación de la oferta hídrica en una cuenca de montaña tropical en función de su cobertura del suelo. *Aqua-LAC*. 7(1):63-76.
11. EMPRESA DE ACUEDUCTO, AGUA Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ, EAAB-ESP. 1997. Plan de Manejo Ambiental de los humedales Torca, Guaymaral, Embalse de Córdoba, Capellanía, El Burro, Techo, La Vaca y Tibanica. Informe sobre diagnóstico y estudio de alternativas evaluación geológica. Tomo 4 – Anexo No. 2. Bogotá, Colombia.
12. EMPRESA DE ACUEDUCTO, ALCANTARILLADO Y ASEO DE BOGOTÁ, EAAB-ESP. 2014. Acta de Reunión Externa – Recorrido Reconocimiento de Tensionantes. Bogotá, D.C.
13. FRANCO VIDAL, L.; DELGADO, J.; ANDRADE, G.I. 2013. Factores de la vulnerabilidad de los humedales altoandinos de Colombia al cambio climático global. *Cuad. Geogr. Rev. Colomb. Geogr.* 22(2):69-85. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v22n2.37018>
14. GARCÍA, J. 2007. Teoría y ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas. Ejercicios avanzados en Dinámica de Sistemas. Capítulo 5.2.
15. HELMENS, K.; VAN DER HAMMEN, T. 1995. Memoria explicativa para los mapas del Neógeno-Cuaternario de la Sabana de Bogotá – Cuenca alta del río Bogotá. En: Plioceno y Cuaternario del altiplano de Bogotá y alrededores. Bogotá, IGAC. Análisis geográficos No. 24 pp. 91-142.
16. INSTITUTO DE ESTUDIOS AMBIENTALES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA,

- IDEAUN; EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ, EAAB-ESP. 2012. Plan de Manejo Ambiental de los Humedales Torca y Guaymaral. (Caracterización Diagnostica). Bogotá, D.C.
17. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM. 2012. Estudio de la caracterización climática de Bogotá y cuenca alta del río Tunjuelo.
18. JARDÍN BOTÁNICO JOSÉ CELESTINO MUTIS, JBJCM. 2016. Ficha de gestión de Parques Ecológicos Distritales de Humedales - PEDH Torca-Guaymaral.
19. JØRGENSEN, S.E. 2003. The application of models to find the relevance of residence time in lake and reservoir management. Papers from Bolsena Conference en Papers from Bolsena Conference: Residence time in lakes: science, Management, Education. *J. Limnology*. 62(Suppl.1):16-20.
20. LÓPEZ-BARRERA, E.A.; FUENTES COTES, M.M.; PLATA RANGEL, A.M. (Coordinadoras). 2015. Humedal Torca – Guaymaral: Iniciativas para su conservación (1^{ra} ed.). Bogotá D.C., Colombia: Fondo de Publicaciones Universidad Sergio Arboleda. 123p.
21. LÓPEZ, N.; ALIOTO, R.; SCHEFER, J.; BELLEGGIA, F.; SINISCALCHI, A.; PARODI, E. 2006. Diseño de un humedal artificial para remoción de nutrientes de un afluente del embalse Paso de las Piedras (Argentina). Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Buenos Aires.
22. MOLINA, N.; PIZA, C.; WILLS, A. 2007. Evaluación del comportamiento hídrico de la ciénaga de Cachimbero, implementando un modelo de balances de flujo. *Rev. Facultad de Ingeniería*. 39:56-68.
23. MONTES DEL OLMO, C.; MANZANO, M.; BORJA BARRERA, F. 2002. Metodología de tipificación hidrológica de los humedales españoles con vistas a su valoración funcional y a su gestión. Aplicación a los humedales de Doñana. *Boletín Geológico y Minero*. 113(3):313-330.
24. MORENO CASASOLA, P. 2012. Los humedales en México. Oportunidades para la sociedad. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Centro de Educación y Capacitación para el Desarrollo Sustentable. México D.F. Instituto de Ecología A.C., Red de Ecología Funcional, México. 28p.
25. MORENO, V.; GARCÍA, J.F.; VILLALBA, J.C. 2005. Descripción general de los humedales de Bogotá. Bogotá: Sociedad Geográfica de Colombia. Academia de Ciencias Geográficas. 29p.
26. PABÓN CAICEDO, J.D. 2011. El cambio climático en el territorio de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. CAR. Universidad Nacional de Colombia. 128p.
27. PEÑA ESCOBAR, S.; RAMIREZ REYES, G.S.; OSORIO GOMEZ, J.C. 2014. Evaluación de una estrategia de fidelización de clientes con dinámica de sistemas. *Rev. Ingenierías Universidad de Medellín*. 14(26):87-104.
28. PIMIENGA, J. 2016. Metodología del análisis de correlación y regresión lineal simple aplicados al caso acción de Ecopetrol y los precios internacionales del petróleo. Programa de Administración de empresas de Universidad de Cartagena.
29. POVEDA, G.; ÁLVAREZ, D.M.; RUEDA, Ó.A. 2011. Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: a review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots. *Clim. Dyn.* 36:2233-2249. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0931-y>
30. PUCHE REGALIZA, J.C.; COSTAS GUAL, J.; ARRANZ VAL, P. 2016. Simulación como herramienta de ayuda para la toma de decisiones empresariales. Un caso práctico. *Rev. métodos cuantitativos para la economía y la empresa*. 21:188-204.
31. REYES-LARA, S.; REYES-MAZZOCO, R. 2009. Efecto de las cargas hidráulica y orgánica sobre la remoción másica de un empaque estructurado en un filtro percolador. *Rev. Mex. Ing. Quím.* 8(1):101-109.
32. RIVERA RONDÓN, C.A.; ZAPATA, A.M.; PÉREZ, D.; MORALES, Y.; OVALLE, H.; ALVAREZ, J.P. 2010. Caracterización limnológica de humedales de la planicie de inundación del río Orinoco (Orinoquía, Colombia). *Acta Biol. Colomb.* 15(1):145-166.
33. SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE, SDA. 2018. Localización Humedal Torca y Guaymaral.
34. VAN DER HAMMEN, T.; GARY, F.; ROSSELLI, L.; CHISACÁ, M.; PONCE, G.; GUILLOT, G.; USECHE, Y.; RIVERA, D. 2008. Protocolo de recuperación y rehabilitación ecológica de humedales en centros urbanos. Secretaría Distrital de Ambiente, Bogotá, D. C., Colombia.