

## MODELACIÓN y PROSPECCIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD HÍDRICA.

*Modeling and prospection of water sustainability*

**Leonel Ignacio de la Paz Gallardo**

Dr. en Cambio Climático y Sostenibilidad

Correspondencia al autor: [Ignapaz64@gmail.com](mailto:Ignapaz64@gmail.com)

Asesorado por: Dr. en Gestión en Recursos Hídricos **Marvin Roberto Salguero Barahona** [marvinsal@gmail.com](mailto:marvinsal@gmail.com)

Recibido: 15 de junio 2019 | Revisado: 17 de junio 2019 | Aprobado: 20 de junio 2019

### Resumen

En esta investigación se propone un modelo matemático para la sostenibilidad hídrica de la sub-cuenca sur de ciudad Guatemala por medio de la valoración de ocho criterios de sostenibilidad, entre ellos tres ambientales que son: la escasez hídrica (fenómeno estudiado), la contaminación ambiental hacia los cuerpos de agua y un factor de demanda de agua por afectación del calentamiento global; tres económicos que incluyen: costo del agua en el sistema público, el del sector privado inmobiliario (colonias, condominios, edificios) y por último la industria que lo incorpora en la producción; en cuanto al tema social se consideran dos criterios: satisfacción del servicio de agua y el índice de estrés social hídrico de cada zona de la ciudad capital analizada (11, 12, 13, 14 y 21).

### Palabras clave

Sostenibilidad hídrica, modelación matemática, cambio climático, recursos hídricos, escasez de agua.

### Abstract

*This research proposes a mathematical model of water sustainability of the southern sub-basin of Guatemala city, through the assessment of the eight sustainability criteria, three of them environmental: water scarcity (studied phenomenon), contamination of the environment towards the water bodies and a water demand factor due to the effects of global warming; three economic factors which include: water cost in the public system, the private real state sector ( Houses, condos and buildings) and last the industry which incorporates it into production of goods. Regarding the social issue, two criteria are considered: a satisfaction survey of the water service and the water stress index of each zone of Guatemala City that were analyzed (11, 12, 13, 14 and 21).*

### Keywords

*Water sustainability, mathematical modeling, climate change, water resources, water scarcity.*

## Introducción

Desde hace varios años la ciudad de Guatemala ha sufrido de escasez de agua y se ha pensado que existen dos formas de arreglar el problema, la primera es aumentar la oferta, captando más fuentes superficiales por medio de embalses y acueductos ubicados afuera del departamento, tal y como sucedió hace diez años cuando se intenta traer agua del municipio de San Lucas Sacatepéquez, enfrentando una gran oposición de la población de esa región. Debido a la falta de certeza jurídica y buena disposición de las autoridades, la comuna metropolitana no ha podido aumentar la oferta de agua de cuencas externas, que hasta el momento ha sido una de tantas dificultades que ha enfrentado; una solución parcial ha sido perforar más pozos en todo el valle. La segunda, es mejorar y optimizar la gestión de la demanda por medio del ahorro, reuso y evaluación de la sostenibilidad.

## Desarrollo del estudio

El estudio tiene un enfoque mixto, de alcance explicativo y correlacional y diseño no experimental. La investigación abarca dos etapas en las que se estudia el fenómeno de escasez de agua buscando aproximarse al conocimiento real de la sostenibilidad hídrica en una cuenca urbana. La primera parte consiste en la modelación matemática, tomando un conjunto de variables claves, que se definen por un grupo de expertos mediante entrevistas a profundidad, en las que se analiza y define el comportamiento de la sostenibilidad hídrica de la subcuenca sur de la ciudad de Guatemala, lo que permite estudiar la interrelación entre las dinámicas socioeconómicas y ambientales que repercuten en la gestión del recurso hídrico, durante el periodo de 1977 a 2014.

La segunda parte se desarrolla con la metodología prospectiva, pues es la que mejor define los escenarios proyectados al año 2030 de forma científica para aproximarse al conocimiento de la sostenibilidad

hídrica. El modelo generado puede ser una herramienta de diagnóstico para decisores y alcaldes, ya que se plantean escenarios probables tales como: escenario pesimista, tendencia, alcanzable o deseado y optimista. La combinación de ambas partes se define por medio de una propuesta metodológica, como un aporte científico. También se realiza una encuesta y se desarrollan ocho indicadores de sostenibilidad los cuales consisten en: tres de la componente ambiental, tres de la componente económica y dos de la componente social.

Las relaciones matemáticas que se utilizan se basan en diferentes criterios:

1) El primer criterio expresa: que el suministro de agua debe cubrir todas las demandas de la población,  $f(CA1)$ . Para muchos hidrólogos es denominado escasez hídrica (fenómeno objeto de esta investigación).

$$f(CA1) = \frac{A}{D} \quad (1)$$

donde:

A = Suministro; D = Demanda

2) Este criterio dice: la demanda de agua es afectada por el calentamiento global  $f(CA2)$ .

Para evaluar los efectos del calentamiento global sobre los recursos hídricos, se considera que la principal consecuencia en la ciudad de Guatemala es el incremento de la temperatura media del ambiente ( $T_i$ ) expresada en ( $^{\circ}C$ ), para definir el incremento se hace uso del concepto de anomalía de temperatura, denotada por ( $\Omega T$ ), que Hernández(2002) define como:

$$\Omega T = T_m - T_i \quad (2)$$

en la cual  $\Omega T$  = anomalía de temperatura;

$T_m$  = temperatura promedio de todos los meses de enero;  $T_i$  = temperatura media del mes analizado.

$$\Omega T_{3m} = \frac{\sum(\Omega T)}{3} \quad (3)$$

$\Omega T_{3m}$  = Persistencia de la anomalía

$\sum \Omega T$  = Sumatoria de anomalías de tres meses consecutivos, y el número 3 indica el promedio de

tres meses, con su signo respectivo, lo cual puede portar indicios de evidencia del cambio climático al graficarlo y analizar su tendencia.

En resumen, se puede indicar que la persistencia de la anomalía el promedio de tres meses consecutivos de la anomalía.

De acuerdo a recomendaciones de expertos, se asume que mientras más alta es la temperatura ambiente, se observa un incremento en la demanda del agua. Para considerar este criterio se incorpora el concepto de Factor de demanda de agua afectada por cambio climático (Dcc), el cual se calcula por medio de la persistencia de la anomalía de temperatura, adoptada por recomendaciones de los expertos y también utilizada por la Agencia Nacional Oceanográfica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA, 2017) para analizar el Fenómeno del Niño.

|                            |          |                 |
|----------------------------|----------|-----------------|
| $\Omega T_{3m} < 0.50C$    | entonces | $D_{cc} = 1.00$ |
| $\Omega T_{3m} \geq 0.50C$ | entonces | $D_{cc} = 1.05$ |
| $\Omega T_{3m} \geq 1.00C$ | entonces | $D_{cc} = 1.10$ |
| $\Omega T_{3m} \geq 1.50C$ | entonces | $D_{cc} = 1.15$ |
| $\Omega T_{3m} \geq 2.00C$ | entonces | $D_{cc} = 1.20$ |

El factor de demanda de agua afectada por el calentamiento global (Dcc) define por lo tanto al segundo componente de la sostenibilidad hídrica así:

$$f(CA2) = D_{cc} \quad (4)$$

3) El tercer criterio expresa: es imprescindible que se minimice la cantidad de contaminación en peso que se vierte al sistema hídrico  $f(CA3)$ .

Para desarrollar este indicador se determina la cantidad de vertidos líquidos hacia el sistema hídrico de la cuenca, para lo cual se propone:

$$f(CA3) = V = \frac{\text{Agua residual tratada}}{\text{Agua residual Generada}} = 1 \quad (5)$$

Para el año 2014 se estima que la ciudad de Guatemala produce 211 millones de m<sup>3</sup>/año de aguas servidas, las cuales son vertidas en dos grandes subcuencas (la norte y la sur), de estas solamente el 27 % van hacia la subcuenca sur (área de estudio de esta investigación: zona 11, 12, 13, 14 y 21) y el río que lo recibe es el Villalobos, que descarga directamente al lago de Amatitlán y posteriormente al río María Linda en la vertiente del Océano Pacífico.

4) Para la componente económica, el primer criterio establece: para que cualquier sistema que presta un servicio de agua se mantenga, los costos de operación deben ser cubiertos por las tarifas prestadas,  $f(CE1)$ .

Este indicador evalúa el sistema público provisto por la Empresa Municipal de Agua de ciudad Guatemala (EMPAGUA):

$$f(CE1) = \frac{(A1)(Ca)}{[(Ao)*(Cp1)+Gv]} \quad (6)$$

$Ao = (a) + (p1)$  en m<sup>3</sup> / mes;  $A1 = Ao - (pa)$  e n m<sup>3</sup>/mes;  $pa = (Ao) (Xrp / 100)$  en m<sup>3</sup> /mes;  $Ao =$  Toda el agua de suministro público (EMPAGUA) superficial y subterránea que sale de las plantas potabilizadoras;  $A1 =$  Toda el agua que logra llegar a las viviendas o que es facturada de acuerdo a su consumo;  $pa =$  total de pérdidas de agua del sistema de distribución;  $Ca =$  canon de agua afectado por el consumo de cada vivienda. Éste varía de acuerdo al sector, en esta investigación se le denomina, canon de agua promedio real.  $Ca =$  Todos los ingresos por agua /  $A1 (Q/ m^3)$ ;  $Cp1 =$  Costo de producción de 1 m<sup>3</sup> de agua en el sector público;

$Cp1 =$  (Presupuesto mensual de EMPAGUA) /  $Ao$  en  $Q/ m^3$  ;  $Gv =$  Todos los gastos varios no contemplados en el presupuesto;  $Gv = (\%Gv) * (\text{Presupuesto mensual de EMPAGUA})$ ;

$\%Gv =$  porcentaje de gastos administrativos no contemplados en el presupuesto;  $Xrp =$  porcentaje de pérdidas de agua en el sistema de distribución;

a = toda el agua superficial que sale de las plantas de EMPAGUA; p1 = Toda el agua subterránea que sale de los pozos de EMPAGUA.

5) Según el segundo criterio de sostenibilidad económica f (CE2) se tiene que: para que un sistema privado de abastecimiento de agua pueda funcionar, como mínimo todos los gastos de inversión, operación y mantenimiento deben ser cubiertos por los usuarios.

$$f(CE2) \geq 1 \geq \frac{(Pv+p2d)}{(Cp2+p2)} = \frac{Q}{Q} \text{ adimensional (7)}$$

Pv = Canon del agua privada en colonias o el precio de venta al consumidor final por el derecho de consumir 30 m3 de agua al mes; p2d = Agua subterránea disponible (en la puerta del usuario) por el sector privado para colonias y condominios en m3/mes, también definida como: p2d = p2 – pb; p2 = Agua subterránea extraída por el sector privado para colonias y condominios de toda la ciudad en m3/mes. Se considera tomar datos de toda la ciudad pues la obtención de información es más accesible; P2 = Ao \*z2; Ao = Toda el agua producida por EMPAGUA, superficial y subterránea, que sale de las plantas potabilizadoras para toda la ciudad en m3 / mes; Z2= Porcentaje de demanda de agua insatisfecha por EMPAGUA; Pb = pérdidas en la red de distribución privada de toda la ciudad en m3/mes Pb = (p2) (Xrpv / 100); Xrpv = porcentaje de pérdidas de agua en la red de distribución privada; Cp2 = Costo de extraer un m3 de agua en las colonias y condominios (Q /m3).

Este segundo criterio económico está dedicado exclusivamente para evaluar la sostenibilidad del agua usada para condominios, colonias y edificios que no son abastecidos con el servicio de agua pública.

6) El tercer criterio económico dice: dado que el agua utilizada por el sector privado es requerida para incorporarla a la producción de un producto su rentabilidad es inherente f(CE3).

El objetivo de este criterio es determinar qué tan sostenible es la operación del uso del agua en la industria, y específicamente la utilizada para producir, desde aquellos procesos que incorporan agua a su producto, hasta los que la requieren como materia prima.

$$f(CE3) = (Pv/m^3) / (Cpv) \quad (8)$$

Pv/m<sup>3</sup> = Precio de venta por vender 1 m<sup>3</sup> de agua embotellada en Q / m<sup>3</sup>; Cpv = Costo de 1 m<sup>3</sup> de agua empacado en el punto de venta en Q / m<sup>3</sup>

7) El primer criterio de sostenibilidad social indica que: la satisfacción del servicio que percibe el cliente sea igual al servicio satisfactorio dado por el proveedor, f (CS1).

Durante el proceso de las entrevistas a profundidad se establece que un servicio satisfactorio es aquel que se provee por lo menos, durante 12 horas continuas todos los días con un caudal mínimo de 3 L / min.

Siguiendo en la línea de este concepto, se analiza que un usuario del servicio de agua para que se sienta satisfecho, por lo menos debe recibir la cantidad de agua que contrata.

$$f(CS1) = \frac{(\text{Agua recibida})}{(\text{Agua contratada})} \quad (9)$$

8) El segundo criterio de la sostenibilidad social, denotado por f (CS2), se basa en lo indicado por Ohlsson (1999), con relación a la necesidad de medir la condición de escasez de agua en el área de estudio y la capacidad de adaptación de la sociedad. La ecuación propuesta es:

$$\mu_5 = \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{d_{5,i}}{h_i}\right) \quad (10)$$

donde:

$\mu_5$  = Índice social de estrés hídrico, adimensional;

$d_{5,i}$  = Índice de estrés hídrico, adimensional y para el caso particular de este estudio;  $h_i$  = IDH Índice de desarrollo humano, adimensional.

### Resultados obtenidos

Con la determinación de los anteriores criterios se realizan cálculos:

$$f(CA) = f(CA1, CA2, CA3)$$

$$f(CA) = \frac{(Aze) \times (Vze^{0.05})}{(Dze) \times (Dcc)}$$

$$f(CE) = f(CE1, CE2, CE3)$$

$$f(CE1, CE2, CE3) = \frac{F(CE1) + F(CE2)}{F(CE1) + 0.162 * F(CE3) + \frac{F(CE1) * F(CE2)}{F(CE3)}}$$

$$f(CS) = f(CS1, CS2)$$

$$f(CS) = f(CS1)^{0.20} * f(CS2)^{0.80}$$

En la Tabla 1 se presentan los valores de las variables en estudio.

Tabla 1

Variables del modelo propuesto  $f(CA, CE, CS)$

| AÑO  | F(CA)0.40 | F(CE)0.35 | F(CS)0.25 | F(CA, CE, CS) |
|------|-----------|-----------|-----------|---------------|
| 1977 | 0.897     | 0.769     | 0.831     | 0.574         |
| 1978 | 0.874     | 0.776     | 0.829     | 0.563         |
| 1979 | 0.855     | 0.762     | 0.828     | 0.540         |
| 1980 | 0.853     | 0.755     | 0.814     | 0.524         |
| 1981 | 0.882     | 0.783     | 0.828     | 0.572         |
| 1982 | 0.909     | 0.791     | 0.855     | 0.614         |
| 1983 | 0.893     | 0.797     | 0.846     | 0.602         |
| 1984 | 0.926     | 0.786     | 0.845     | 0.616         |
| 1985 | 0.923     | 0.775     | 0.842     | 0.602         |
| 1986 | 0.917     | 0.776     | 0.844     | 0.601         |
| 1987 | 0.932     | 0.784     | 0.848     | 0.620         |
| 1988 | 0.932     | 0.777     | 0.845     | 0.612         |
| 1989 | 0.930     | 0.761     | 0.859     | 0.608         |
| 1990 | 0.953     | 0.791     | 0.862     | 0.650         |
| 1991 | 0.915     | 0.860     | 0.831     | 0.654         |
| 1992 | 0.924     | 0.923     | 0.827     | 0.706         |
| 1993 | 0.937     | 0.926     | 0.834     | 0.724         |
| 1994 | 0.924     | 1.063     | 0.816     | 0.802         |
| 1995 | 0.955     | 1.065     | 0.846     | 0.860         |
| 1996 | 0.953     | 1.087     | 0.833     | 0.863         |
| 1997 | 0.940     | 1.125     | 0.814     | 0.860         |
| 1998 | 0.901     | 1.136     | 0.818     | 0.837         |
| 1999 | 0.941     | 1.136     | 0.823     | 0.880         |
| 2000 | 0.932     | 1.163     | 0.789     | 0.855         |
| 2001 | 0.960     | 1.268     | 0.729     | 0.888         |
| 2002 | 0.952     | 1.216     | 0.796     | 0.921         |
| 2003 | 0.935     | 1.256     | 0.779     | 0.916         |
| 2004 | 0.950     | 1.349     | 0.782     | 1.002         |
| 2005 | 0.914     | 1.374     | 0.765     | 0.961         |
| 2006 | 0.939     | 1.402     | 0.769     | 1.013         |
| 2007 | 0.918     | 1.363     | 0.749     | 0.937         |
| 2008 | 0.906     | 1.357     | 0.762     | 0.937         |
| 2009 | 0.882     | 1.357     | 0.739     | 0.883         |
| 2010 | 0.904     | 1.355     | 0.763     | 0.935         |
| 2011 | 0.907     | 1.357     | 0.762     | 0.938         |
| 2012 | 0.896     | 1.373     | 0.738     | 0.908         |
| 2013 | 0.902     | 1.386     | 0.744     | 0.929         |
| 2014 | 0.891     | 1.438     | 0.724     | 0.927         |

Fuente: elaboración propia.

El modelo matemático que describe el comportamiento de los datos de la Tabla 1 es:

$$f(CA, CE, CS) = 0.24 + 0.455 (CE) (CS) + 0.346 (CA)^2$$

Los datos de ajuste del modelo son:

- Coefficiente de correlación:  $r = 0.9973207$
- Coefficiente de determinación:  $R^2 = 0.99387634$
- Error Máximo = 0.033314366
- Error medio cuadrático = 0.00014889793
- Error medio absoluto = 0.0086268834

Debido a que la base fundamental de la sostenibilidad hídrica es la existencia suficiente y oportuna del recurso agua, dentro de este escenario se contempla el suministro de agua de una fuente superficial adicional a la ya existente con un caudal mínimo de 8 m<sup>3</sup>/s, disponible para iniciar operaciones a más tardar el año 2023, si lo que se desea es mantener el nivel de sostenibilidad por lo menos en 0.74.

El escenario deseado (ver figura 1) según el análisis prospectivo que se desarrolla en este estudio, indica que puede ser alcanzable de acuerdo a los siguientes eventos probabilizados.

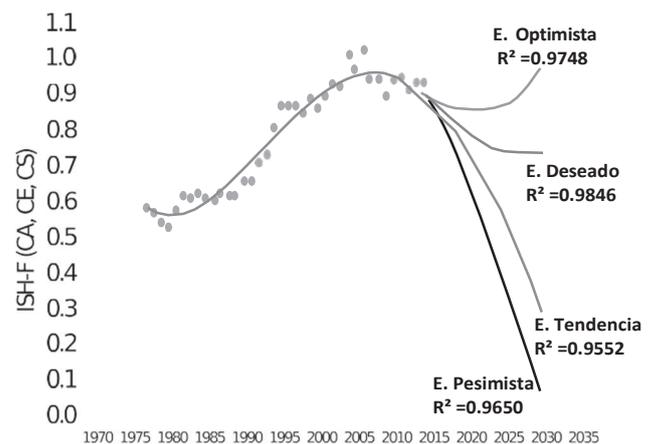


Figura 1. Resumen de los posibles escenarios del índice de sostenibilidad hídrica (ISH).

- a) Se inicia programa urgente en cada una de las zonas de estudio para minimizar las fugas (en no más del 5 %) en la red de distribución de agua, lo cual permite recuperar el 75 % del caudal perdido.
- b) El precio del agua sube a consecuencia de las inversiones en la renovación de redes de tubería, pues se traslada el costo en la factura del usuario.
- c) Al mejorar los caudales de agua disponibles, se aumentan las horas de abasto en el suministro, lo cual relaja al usuario y evita las protestas por el aumento de precio.
- d) El nivel de sostenibilidad hídrica alcanzado en este escenario es de un 0.74 para el año 2030, siempre y cuando se comience por emprender estos proyectos no más allá del año 2018.

### Discusión de resultados

Al graficar los datos proporcionados por la Tabla 1 se logra observar la tendencia que el índice de sostenibilidad hídrica de la zona de estudio ha tenido a través del tiempo (1977-2014).

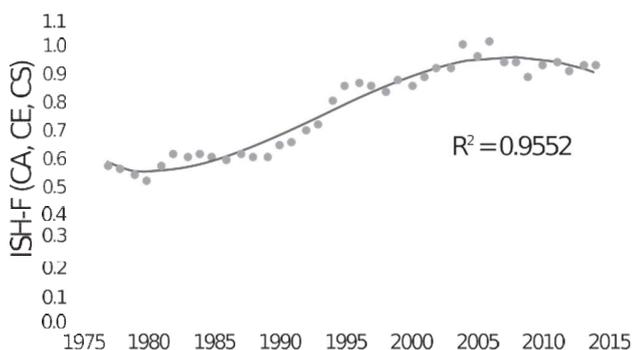


Figura 2. Trayectoria del índice de sostenibilidad hídrica total (ISH).

Se esperaba que la trayectoria de la sostenibilidad hídrica fuese decreciente, o sea, que con respecto

al tiempo ésta disminuyera, pero su comportamiento es totalmente opuesto de acuerdo con los datos analizados; y esa es la evidencia construida y proyectada de lo que ha pasado en la cuenca sur de la ciudad de Guatemala.

Sin embargo, en los últimos cinco años, el valor esperado ha comenzado a decrecer desde 0.95 hasta 0.90 (ver Figura 2).

En cuanto al escenario deseado se contempla la implementación de un proyecto de trasvase de agua de una cuenca externa, construcción de un acueducto y de una represa, también se considera la inversión en la renovación de la tubería de abastecimiento para reducir en por lo menos un 5 % de fugas. Y por supuesto la modernización administrativa de EMPAGUA.

Finalmente, en este escenario se plantea la existencia de una ley de aguas con un porcentaje de implementación del 75 % por lo menos para el año 2020, lo anterior implica contar con un abasto de agua de por lo menos 8 m<sup>3</sup>/s para el año 2023 para la zona de estudio (zonas 11, 12, 13, 14 y 21).

### Conclusiones

1. El proceso de modelación matemática permite aproximarse al conocimiento real de lo que sucede con la sostenibilidad hídrica en la subcuenca sur de la ciudad de Guatemala, mediante la descripción de la trayectoria a lo largo del tiempo, el valor en que se encuentra en el presente y proyecciones de escenarios futuros.
2. El modelo matemático establece cuáles componentes son las que más impactan al recurso hídrico, posibilitando la toma de decisiones con base en los modelos individuales que se generan para la valoración particular de cada componente.

## Recomendaciones

- 1 Para futuros estudios relacionados con la variabilidad climática tales como temperatura, precipitación y series ambientales (INSIVUMEH, 2006) se recomienda ampliar la base de datos a 100 o más años de ser posible para encontrar evidencias de cambio climático más sólidas y con mejores tendencias para su análisis.
  
- 2 Para hacer realidad el escenario deseado debe contarse con una ley de aguas e implementarla por lo menos en un 75 %, también considera tomar en cuenta el programa de responsabilidad social empresarial, y un artículo en la ley de aguas, que permita que cada propietario de un pozo que usufructúa el agua, proporcione un 20 % del caudal utilizado hacia el sistema gubernamental (EMPAGUA) y que éste se incorpore hacia la distribución de la población. El otro 80 % deberá pagar un impuesto que mantenga los sistemas de distribución en óptimas condiciones y con ello se (reduzca al mínimo las pérdidas por fugas, también se consideran en las zonas de recarga hídrica y otros proyectos como pozos de absorción

## Referencias bibliográficas

- Enfield, D. (1996). *Relationships of inter-American rainfall to tropical Atlantic and Pacific SST variability*. Geophys. Res. Lett., 23: 3505-3508.
- Hernández, B. (2002). *Variabilidad interanual de las anomalías de la temperatura superficial del mar en aguas cubanas y su relación con eventos El Niño-Oscilación del Sur (ENOS)*, Centro de Investigaciones Pesqueras, Ciudad de la Habana, Cuba.

INSIVUMEH. (2006). *Archivo de datos hidrológicos y meteorológicos de Guatemala*. INSIVUMEH, CIV, Guatemala. 78 p

NOAA, (2017). *Reporte oficial, enlace en internet recuperado de: <http://elblogdelatierra.blogspot.com/2013/04/anomalias-de-la-temperatura-global-anual.html>*

Ohlsson, L. (1999). *Environment, Scarcity, and conflict – A study of Malthusian concerns*. Dept. of Peace and Development Research, University of Goteborg, Suecia.

## Información del autor

Ingeniero Químico, Leonel Igancio de la Paz Gallardo, egresado de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2007.

Maestro en Artes en Energía y Ambiente, egresado de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2013.

Doctor en Cambio Climático y Sostenibilidad, egresado de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2018.

Afiliación laboral; Consultor independiente.