

## Huella De Carbono De Un Humedal Artificial Diseñado Para La Planta De Tratamiento De La Uasd Recinto Santiago

Por Rodríguez Vicente, Lisandra ; Navarro Roa, Zacarías Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD), Facultad de Ingeniería lisandrarodriguezvicente@gmail.com

### • Abstract

Wastewater is a source of greenhouse gas (GHG) emissions, both directly and indirectly. Waste management activities, including wastewater, generate the three (3) main GHGs: carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) and methane (CH<sub>4</sub>).

This research aims to evaluate the IPCC Calculation Methodology used to Estimate the Carbon Footprint of an Upflow Anaerobic Reactor, Incorporating the Design of an Experimental Artificial Wetland Tertiary Treatment System, Santiago Regional University Center Case, using the recommended methodology for national inventories of developing countries (non-Annex I Parties), according to the good practice guides of the 2006 IPCC Guidelines for the Waste sector, specifically for Wastewater Treatment Domestic and using Excel spreadsheets, of their own authorship, based on the equations developed in said guidelines. For the artificial wetland proposed as tertiary treatment, the RAS 2000 method was used for its design, while for the estimation of emissions it used the 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for national inventories of greenhouse gases for wetlands. With the implementation of the artificial wetland, CO<sub>2</sub>e emissions will be reduced by approximately 90%.

### • Keywords

Wastewater, IPCC Guidelines, Carbon Dioxide Equivalent (CO<sub>2</sub> e), Carbon Footprint, Constructed Wetland.

### • Resumen

Las aguas residuales son una fuente de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), tanto de

manera directa como indirectamente. Las actividades de gestión de residuos, incluidas las aguas residuales, generan los tres (3) principales GEI: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y metano (CH<sub>4</sub>).

En esta investigación se pretende la Evaluación de la Metodología de Cálculo de la IPCC utilizada para Estimar la Huella De Carbono de un Reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente, Incorporando el Diseño de un Sistema de Tratamiento Terciario de Humedal Artificial Experimental, Caso Centro Universitario Regional Santiago, empleando la metodología recomendada para los inventarios nacionales de los países en vías de desarrollo (Partes no-Anexo I), de acuerdo a las guías de buenas prácticas de las Directrices del IPCC del 2006 para el sector Desechos, específicamente para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas y utilizando hojas de cálculo de Excel, de autoría propia tomando como base las ecuaciones desarrolladas en dichas directrices.

Para el humedal artificial propuesto como tratamiento terciario se empleó para su diseño el método RAS 2000, mientras que para la estimación de las emisiones utilizó el Suplemento de 2013 a las Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero para humedales.

Con la implementación del humedal artificial, las emisiones de CO<sub>2</sub>e serán reducidas en un 90% aproximadamente.

### • Palabras clave

Aguas residuales, Directrices IPCC, Dióxido de Carbono Equivalente (CO<sub>2</sub>e), Huella de Carbono,

## • Introducción

Las aguas residuales son una fuente de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), tanto de manera directa como indirectamente. Las actividades de gestión de residuos, incluidas las aguas residuales, generan los tres (3) principales GEI: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y metano (CH<sub>4</sub>).

La HdC es la suma de todos estos GEI, producidos directa o indirectamente por una persona, industria, artículo, institución o evento y es evaluada a través de la Huella de Carbono equivalente, medida en unidades másicas de CO<sub>2</sub> equivalente (kg CO<sub>2</sub>-e) (Houghton, y otros, 2001).

La planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) del Recinto de la Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD-Santiago), ubicado en La Barranquita, fue construida en el año 2000, entró en funcionamiento para el año 2004, y desde el año 2007 luce en estado de abandono, con los siguientes componentes:

Colector de aguas crudas, un (1) desarenador con rejilla de barras, dos (2) reactores anaeróbicos, cuatro (4) filtros biológicos – anaeróbicos, cisterna para el almacenamiento del agua tratada (Vásquez de la Cruz, Peralta Almonte, & Moronta Romano, 2018); finalmente descarga al arroyo Pastor el cual es el cuerpo receptor de todo el proceso. Como tal, el sistema de tratamiento soporta el volumen o la carga generada en la universidad, pero la falta de mantenimiento ha provocado que se deteriore y actualmente no está depurando el efluente producido en el recinto.



Figura 1. Ubicación de la Planta de Tratamiento del Recinto Santiago de los Caballeros de la Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD-Santiago)

Fuente: (Google LLC, 2021)

Esta planta está diseñada para soportar 7.676 L/s (663.21 m<sup>3</sup>/día) de agua residual doméstica, aportadas de los 17,795 usuarios universitarios registrados en las diferentes áreas del recinto universitario. Las aguas servidas son tratadas de forma anaeróbica.

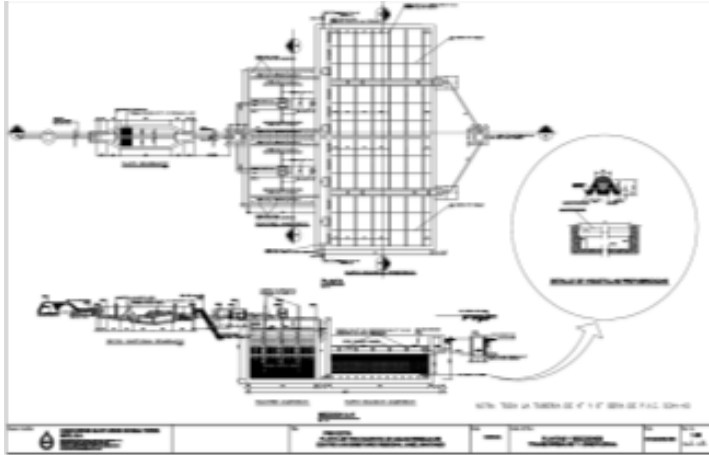


Figura 2. Diseño de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Recinto Universitario UASD-Santiago

Fuente: (Universidad Autónoma de Santo Domingo, recinto Santiago, 2004)

Uno de los factores principales de generación de CO<sub>2</sub> en una PTAR es atribuido al proceso de tratamiento (Campos, y otros, 2016). En el proceso anaerobio la DBO<sub>5</sub> se convierte en biomasa o en CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> que se produce a partir de la degradación biológica de la materia orgánica en condiciones anaerobias a partir del agua o del lodo de purga, mientras que el N<sub>2</sub>O se genera como subproducto durante la eliminación de nutrientes en plantas de tratamiento avanzado de aguas residuales o en el medio receptor natural donde el efluente es descargado, específicamente a partir del material contenido en aguas residuales en forma de urea, amoníaco y proteínas de los alimentos (Thomsen & Lyck, 2005); (Gupta & Singh, 2012) (Ramírez Melgarejo, 2020); (Farrell, Kerr, Brandt, Tom, & Franco, 2005). El Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) proponen una metodología de cálculo para las estimaciones de emisiones de GEI en los inventari-

os nacionales. En esta investigación se aplica la Metodología de Cálculo de la IPCC para Estimar la Huella De Carbono de un Reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente, Incorporando el Diseño de un Sistema de Tratamiento Terciario de Humedal Artificial Experimental, Caso Centro Universitario Regional Santiago.

### • Materiales y métodos

La presente investigación se realizó empleando la metodología recomendada para los inventarios nacionales de los países en vías de desarrollo (Partes no-Anexo I), de acuerdo a las guías de buenas prácticas de las Directrices del IPCC del 2006 para el sector Desechos, específicamente para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas y utilizando hojas de cálculo de Excel, de autoría propia tomando como base las ecuaciones desarrolladas en dichas directrices.

Los datos de actividad utilizados en esta investigación fueron los datos de entrada para de la PTAR UASD Recinto Santiago (datos de operación): población universitaria, caudal de diseño del sistema. Además, se evaluaron vía laboratorio los siguientes parámetros químicos: DBO<sub>5</sub>, nitritos NO<sub>2</sub>, nitratos NO<sub>3</sub>, nitrógeno amoniacal (NH<sub>3</sub>).

En esta investigación se utilizaron datos muestreados periódicamente de manera simple, durante un (1) año y seis (6) meses, en días representativos del proceso generador de la descarga. Las muestras se tomaron en envases de plástico de 1000 mL de capacidad, para su posterior análisis en laboratorio. Se utilizaron equipos en bancada de laboratorio de parámetros fisicoquímicos, basados en las exigencias de los reglamentos de calidad de agua y control de descargas del Ministerio de Medio Ambiente

y Recursos Naturales, se cuenta con los siguientes aparatos para el monitoreo de la calidad del agua:

- Agua destilada;
- Cristalería de laboratorio;
- Frascos para muestras de análisis fisico-químicos y microbiológicos;
- Recipientes plásticos para recolección de muestras.

Así como otras herramientas tales como: Mapas y fotografías aéreas, sistemas de información geográfica y GPS Garmin: GPSmap 62s.

Se diseñó un humedal o wetlands de flujo subsuperficial horizontal, previamente conectado al sistema de tratamiento integrado por desarenador con rejilla de barras, reactores anaeróbicos, filtros biológicos – anaeróbicos, para deponer los sólidos suspendidos totales y reducir la carga de DBO5 de las aguas tratadas antes de llegar al humedal. Se tomaron en cuenta las macrofitas que se colocarán sobre el medio filtrante.

Se proponen macrofitas enraizadas que sean perennes, con grandes rizomas, que toleren altas temperaturas y alta insolación y deben ser adaptables a suelos arenosos altamente húmedos (Hammel, Grayum, Herrera, & Zamora, 2003), una base de geotextil y geomembrana impermeable, grava, tuberías flexibles.

La planta funcionará de la manera siguiente:

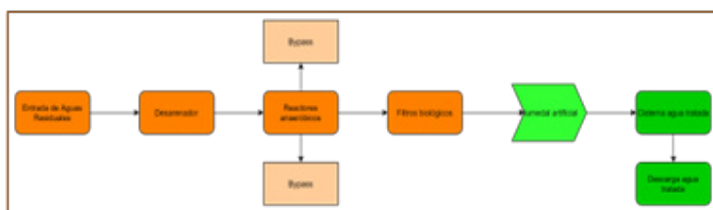


Figura 3. Diagrama del proceso de la PTAR Recinto Universitario UASD-Santiago.

Fuente: Elaboración propia

- **Estimación de emisiones del sistema de tratamiento convencional que opera en el recinto Universitario UASD Santiago**

Atendiendo a una revisión detallada de la metodología descrita en las Directrices del Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), se tuvo en cuenta el procedimiento descrito para un Nivel 1, que permite introducir valores por defecto para el factor de emisión y para los parámetros de proceso, tomando en cuenta la información que se obtuvo en cada uno de los procesos de la planta de tratamiento de aguas residuales del del Recinto UASD-Santiago.

Para el CH4 generado durante el proceso de tratamiento convencional existente, se tomó en cuenta la ecuación general para estimación de emisiones de metano de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Para esto fue necesario agotar los tres (3) pasos propuestos por las Directrices IPCC:

**Paso No. 1** Estimar el contenido total de carbono orgánico degradable en las aguas servidas (TOW, del inglés Total Organic Waste) mediante la Ecuación:

Ecuación 1  
 $TOW = P \cdot DBO \cdot 0.001 \cdot I \cdot 365$ ; Fuente: (IPCC, 2006)

Donde:  
 TOW = total de materia orgánica en las aguas residuales del año del inventario, kg.  
 DBO-año-1; P = población del territorio en el año del inventario, (personas); DBO = DBO per cápita específico del territorio en el año del inventario, g/persona/

día; 0.001 = conversión de gramos de DBO a kilogramos de DBO; I = factor de corrección para DBO industrial adicional eliminada en las cloacas (si es recolectada, el valor por defecto es 1.25, si no es recolectado entonces el valor por defecto es 1.00). El total de materia orgánica promedio estimado, a partir de los resultados de la DBO5 estimada en laboratorio fueron los siguientes:

**Tabla 1**

<b>DBO (g/persona/día)</b>		
<b>Desarenador</b>	<b>Reactores</b>	<b>Filtros</b>
1.21	0.52	0.41
<b>Total de materia orgánica en las aguas residuales (TOW, por sus siglas en inglés) (kg de DBO/año)</b>		
9,834.11	4,236.23	3,328.47

Fuente: elaboración propia

**Paso No. 2** Elegir la vía y/o el sistema de tratamiento, según los datos de la actividad para el caso objeto de estudio, en este caso el factor corrector para el metano (MCF) será para una planta de tratamiento aeróbica centralizada (mal operada-sobrecargada). Usando la Ecuación 3 para obtener el factor de emisión para cada vía o sistema de tratamiento y/o eliminación de aguas servidas domésticas.

El factor de emisión es una función del potencial máximo de producción ( $B_0$ ) de  $CH_4$  y del factor de corrección para el metano (MCF) para el sistema de tratamiento y eliminación de aguas residuales (IPCC, 2006).

**Ecuación 2**

$FE_j = B_0 \cdot MCF_j$ ; Fuente: (IPCC, 2006)

Donde:

$FE_j$  es el factor de emisión, kg de  $CH_4$ /kg de DBO;  $j$  es cada vía o sistema de tratamiento y/o eliminación;  $B_0$  es la capacidad máxima de producción de  $CH_4$ , kg de  $CH_4$ /kg de DQO;  $MCF_j$  es el factor corrector para el metano (fracción).

Las Directrices IPCC del 2006 propone un valor por defecto para el MCF en aguas residuales domésticas para un reactor anaeróbico, descrito a continuación:

**Tabla 2**

<b>Valores de MCF por defecto para aguas residuales domésticas</b>		
<b>Tipo de vía o sistema de tratamiento y eliminación</b>	<b>MCF por defecto</b>	<b>Intervalo de confianza</b>
Reactor anaeróbico	0.8	0.8 – 1.0

Fuente: (IPCC, 2006)

Por otro lado, en el caso de la capacidad máxima de producción de  $CH_4$  el valor por defecto propuesto para aguas residuales domésticas en las Directrices IPCC 2006 es:

**Tabla 3**

<b>Capacidad máxima de producción de <math>CH_4</math> (<math>B_0</math>) por defecto para las aguas residuales domésticas</b>
0.6 kg de $CH_4$ /kg de DBO

Fuente: (IPCC, 2006)

**Paso No. 3** se procede a la medición de las emisiones de  $CH_4$ , producto de las aguas residuales.

### Ecuación 3

Emisiones de CH<sub>4</sub>

$$= \left[ \sum_{i,j} (U_i \cdot T_{i,j} \cdot FE_j) \right] (TOW - S) - R$$

Fuente: (IPCC, 2006)

Donde:

Emisiones de CH<sub>4</sub> son las emisiones de CH<sub>4</sub> durante el año del inventario, kg de CH<sub>4</sub>/año; TOW= total de materia orgánica en las aguas residuales del año del inventario, kg de DBO-año-1; S es el componente orgánico separado como lodo durante el año del inventario, kg de DBO-año-1; U<sub>i</sub> es fracción de la población del grupo de ingresos i en el año de inventario; T<sub>i,j</sub> es el grado de utilización de vía o sistema de tratamiento y/o eliminación j, para cada fracción de grupo de ingresos i en el año del inventario; i es el grupo de ingresos: rural, urbano de altos ingresos y urbano de bajos ingresos; j es la cada vía o sistema de tratamiento/eliminación; FE<sub>j</sub> es el factor de emisión, kg de CH<sub>4</sub>/kg de DBO; R es la cantidad de CH<sub>4</sub> recuperada durante el año del inventario, kg de CH<sub>4</sub>/año.

La planta no dispone de proceso unitario para separación de lodos, al igual que no existe recuperación de metano.

Asumiendo que la población estimada pertenece a los renglones rural y urbana y, con el propósito de identificar la fracción de ingresos (U) de la población estudiantil del recinto universitario UASD Santiago y el grado de utilización de la vía del tratamiento (T<sub>ij</sub>) que sugieren los expertos, atendiendo a la metodología del IPCC, se desarrolló una

revisión de la información estadística poblacional y los cálculos del inventario nacional de gases de efecto invernadero del año 2015 (INGEI 2015) publicado en el Primer Informe Bienal de Actualización (fBUR, por sus siglas en inglés). Teniendo en cuenta la información recopilada en cuanto a las proyecciones de ingresos del sector rural y urbano (urbana alta y urbana baja), se identificaron los valores U y T<sub>ij</sub> seleccionando el valor propuesto por los expertos dentro del por ciento de la población para cada uno de los casos, de esta información se obtuvo la Tabla 4.

**Tabla 4**

U <sub>i</sub> (fracción de la población del grupo de ingresos i)	%
Rural	0.25
Urbana alta	0.35
Urbana baja	0.40
T <sub>ij</sub> (grado de utilización de vía o sistema de tratamiento y/o eliminación j)	1.00

Fuente: elaboración propia, a partir de datos obtenidos en la base de datos de INGEI 2015 del (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Consejo Nacional para el Cambio Climático y Mecanismo de Desarrollo Limpio y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2020)

Para el N<sub>2</sub>O generado durante el proceso de tratamiento

Según las informaciones descritas en las Directrices IPCC 2006, para estimación de emisiones de N<sub>2</sub>O se debe cumplir con lo siguiente:

**Paso No. 1** Elegir los datos de actividad correspondientes a la vía o sistema de tratamiento, requeridos para la estimación de las emisiones de N<sub>2</sub>O. Los datos de la actividad requeridos para la estimación de emisiones de N<sub>2</sub>O son el contenido de nitrógeno en el efluente de aguas servidas, la población del país, y el promedio anual de generación de proteína per cápita (kg/persona/año) (IPCC, 2006). Para el caso de estudio se estimó el Nitrógeno total generado en la PTAR por medio del Método de Kjeldahl que plantea el (Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), 2011) utilizando los datos obtenidos en laboratorio del NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub> y NH<sub>3</sub> de la planta analizada en este estudio. No se midió en laboratorio el N Orgánico, por esto no fue tomado en cuenta en esta ecuación.

#### Ecuación 4

$$NT = (NO_2^-) + (NO_3^-) + (NH_4^+ \rightleftharpoons NH_3 + H^+) + (N \text{ Orgánico})$$

Fuente: (Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), 2011)

Donde:

NT es el nitrógeno total;

NO<sub>3</sub><sup>-</sup> es la cantidad de Nitratos; NO<sub>2</sub><sup>-</sup> es la cantidad de Nitritos; NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ↔ NH<sub>3</sub> + H<sup>+</sup> es

la cantidad de Nitrógeno amoniacal ya que todo el nitrógeno que existe como ion amonio o en el equilibrio es considerado Nitrógeno amoniacal (Sawyer, McCarty, & Parkin, 2001); N orgánico es el nitrógeno orgánico.

Como el resultado obtenido para el Nitrógeno total es en mg.L-1, este es convertido a kg.año-1, to-

mando en consideración la ecuación siguiente:

#### Ecuación 5

$$NT \left( \frac{mg}{L} \right) = \left( NT \left( \frac{mg}{L} \right) \right) \times Q \left( \frac{L}{seg} \right) \times 31.536 \left( \frac{mg/seg}{kg/año} \right)$$

Fuente: (Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), 2011)

Donde:

NT es el nitrógeno total de Kjeldahl en mg.L-1; Q es el caudal de diseño del sistema en L.seg-1; 31.536 es el parámetro de conversión de mg.seg-1 a kg.año-1.

Partiendo de las mediciones de Nitrito, Nitrato y Nitrógeno amoniacal evaluados en el laboratorio, se pudo determinar el Nitrógeno Total (NT) en cada uno de los procesos de la PTAR UASD Santiago, según se detalla en Tabla 5.

**Tabla 5**

Emisiones de NT (mg/L)		
Desarenad or	Reactores	filtros
48.00	20.30	6.17

Fuente: elaboración propia

**Paso 2:** Seleccionar el factor de emisión para cada vía o sistema de tratamiento y/o eliminación de aguas servidas domésticas.

El factor de emisión por defecto del IPCC para las emisiones de N<sub>2</sub>O derivadas de aguas servi-

das domésticas con efluentes con nitrógeno es de 0.005 (0.0005 – 0.25) kg N<sub>2</sub>O-N/Kg N. Este factor de emisión está basado en datos insuficientes relacionados con el terreno y sobre hipótesis específicas tangenciales a la nitrificación y desnitrificación en ríos y estuarios.

Paso 3: Se procede a la medición de las emisiones de N<sub>2</sub>O, producto de las aguas residuales. La metodología utilizada para las emisiones de N<sub>2</sub>O derivadas por efluentes se describe en la ecuación 7.

### **Ecuación 6**

$$Emisiones\ de\ N_2O = N_{Efluente} \times FE_{Efluente} \times 44/28; \text{ Fuente: (IPCC, 2006)}$$

Donde:

Emisiones de N<sub>2</sub>O son las emisiones de N<sub>2</sub>O durante el año del inventario, kg de N<sub>2</sub>O/año; N Efluente es el nitrógeno total de Kjeldahl anual en el efluente eliminado en medios acuáticos, kg de N/año; FE Efluente es el factor de emisión para las emisiones de N<sub>2</sub>O provenientes de la eliminación en aguas servidas, kg de N<sub>2</sub>O/kg de N; el factor 44/28 corresponde a la conversión de kg de N<sub>2</sub>O-N en kg de N<sub>2</sub>O.

Estimación de emisiones del sistema de tratamiento terciario propuesto (humedal artificial) en el recinto Universitario UASD Santiago

Diseño Hidráulico del Humedal Artificial Superficial  
En el caso del humedal artificial, se propuso un diseño aplicando el Modelo de Diseño RAS 2000, asumiendo que el sistema presenta un correcto funcionamiento al momento de operar. Esta metodología tiene en cuenta los siguientes criterios: conductividad hidráulica, granulometría y flujo sumergido para el caudal de diseño.

Este modelo se basa en la relación básica entre las

concentraciones del flujo contaminante de entrada y salida y asumiendo periodos de flujo estables (Asprilla, Ramírez, & Rodríguez, 2020), según lo indicado en la ecuación siguiente.

### **Ecuación 7**

$$\frac{c_e}{c_0} = \exp. (K_T \times T);$$

**Fuente: (Asprilla, Ramírez, & Rodríguez, 2020)**

Donde:

C<sub>e</sub> es la concentración en el efluente (mg.L<sup>-1</sup>); C<sub>0</sub> es la concentración en el afluente (mg.L<sup>-1</sup>); K es la constante de primer orden dependiente de la temperatura (d<sup>-1</sup>); T es el tiempo de retención hidráulico (d).

El tiempo de retención hidráulica en el humedal, podría calcularse a partir de la siguiente ecuación.

### **Ecuación 8**

$$t = L \times W \times y \times \frac{n}{Q};$$

**Fuente: (Asprilla, Ramírez, & Rodríguez, 2020)**

Donde:

L es la longitud del humedal (m); W es el ancho del humedal (m); y es la profundidad del agua en el humedal (m); n es la porosidad o el espacio disponible para que el agua fluya a través del humedal; Q es el caudal medio a través del humedal (m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup>).

Asumiendo que el humedal artificial tendrá una profundidad de 0.70 m, ya que en el área de estudio no se cuenta con suficiente espacio; se utilizará grava mediana con un tamaño efectivo de 32.00 mm como medio filtrante, la cual presenta una po-

rosidad entre 36 y 40.00% y una conductividad hidráulica de 10,004.00 y 50,020.00 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d (Crites, Middlebrooks, & Reed, 2006).

Como dato base para el cálculo de la constante de primer orden, es necesario determinar la temperatura que necesita el sistema para su operación, tomando en cuenta las condiciones del clima del área estipulada para la instalación del humedal.

Esto para realizar el cálculo de la constante de primer orden que requiere la ecuación, la cual es importante para el control microbiano (Kadlec & Wallace, Treatment Wetlands, 2009).

### Ecuación 9

$$K_T = K_{20}(1.06)^{T-20};$$

Fuente: (Kadlec & Wallace, Treatment Wetlands, 2009)

Donde:

K<sub>20</sub> es la constante de reacción a una temperatura de 20°C, igual a 1.104 d<sup>-1</sup>; T es la temperatura según el clima de la zona.

Las aguas residuales para este estudio son tratadas en la PTAR UASD, donde la temperatura promedio del ambiente, en el tiempo de evaluación de la planta, es de 24.54°C en la mayoría del año, según datos reportados por la Oficina Nacional de Meteorología (ONAMET). El caudal de diseño de la PTAR para el espacio universitario es de 7.676 L.s<sup>-1</sup>.

Tomando como información de referencia la experiencia en cuanto a la estimación de un sistema de postratamiento de aguas residuales domésticas, tratadas preliminarmente en un reactor anaerobio UASB, la cual también dispone de un humedal artificial de flujo subsuperficial, ubicado en distintas universidades tales como: la Universidad de Boyacá; Universidad Javeriana, Cogua, Cundinamarca, am-

bas en Colombia. Las características más relevantes del sistema son los tiempos de retención en los espacios intersticiales del material de soporte, caudal promedio, donde las eficiencias promedio de remoción para la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), encontradas durante toda la evaluación, estuvieron alrededor de los siguientes valores.

**Tabla 6**

Universidades	Eficiencias de remoción DBO <sub>5</sub> (%)
Universidad Javeriana	66.00
Universidad de Boyacá	45.10

Fuente: (Lara, Díaz, Usaquén, & Forero, 1997) (Lara Borrero & Vera Puerto, 2005)

Para determinar la eficiencia de la PTAR UASD Santiago se utilizó la ecuación siguiente.

### Ecuación 10

$$E\% = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100;$$

Fuente: (Romero Rojas, Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principios de Diseño, 1999)

Donde:

E% es la eficiencia del sistema en remoción de contaminantes, en por ciento; C<sub>0</sub> es la concentración en el afluente (m.L<sup>-1</sup>); C<sub>e</sub> es la concentración en el efluente (mg L<sup>-1</sup>).

Para el diseño del humedal, la importancia del método se ubica en la cantidad máxima de contaminante (mg DBO<sub>5</sub>.d<sup>-1</sup>) de DBO<sub>5</sub> que se pueda introducir al humedal por cada metro cuadrado (Von Münch,

2009). Es por esto que, para hacer el cálculo de la dimensión que se necesita para el humedal se tuvo en cuenta los siguientes parámetros: caudal de agua residual a tratar (m<sup>3</sup>.d-1); la concentración de DBO5 del agua residual tanto a la entrada como a la salida (mg DBO5/L); la constante de primer orden, la profundidad del humedal. A partir de la ecuación 12 se determinó el área superficial.

### **Ecuación 11**

$$A_s = \frac{Q \times \ln\left(\frac{C_0}{C}\right)}{K_t \times h \times \mu};$$

Fuente: (Rabat Blázquez, 2016)

Donde:

AS= área superficial del humedal (m<sup>2</sup>); Q es el caudal medio diario de aguas servidas (m<sup>3</sup>.d-1); C es la concentración de DBO5 al salir en mg.L-1; C0 es la concentración de DBO5 al entrar en mg.L-1; Kt es la constante de primer orden dependiendo de la temperatura en d-1; μ es la porosidad del medio filtrante; h es la profundidad del humedal.

Luego, se calculó el área transversal del dispositivo, considerando la relación largo:ancho del humedal artificial, a partir de la ecuación siguiente:

### **Ecuación 12**

$$A_c = \frac{Q}{K_s \times S};$$

Fuente: (Carvajal Arias, Ortiz, & Vega Beltrán, 2017)

Donde:

Ac es el área transversal perpendicular al flujo (m<sup>2</sup>); Q es el caudal medio a través del humedal (m<sup>3</sup>.d-1); Ks es la conductividad hidráulica (m<sup>3</sup>.m-2.d-1); S es la pendiente del lecho (como fracción decimal).

Utilizando la ecuación de Darcy para determinar la Carga Superficial o carga hidráulica, del filtro para asegurar que el agua fluirá al interior del lecho filtrante.

### **Ecuación 13**

$$S_0 = \frac{Q}{A_s};$$

Fuente: (Lombard-Latune & Molle, 2017)

Donde:

S0= carga hidráulica (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d); Q es el caudal medio a través del humedal (m<sup>3</sup>.d-1); As es el Área superficial de la celda de humedal, m<sup>2</sup>.

Se realizó una estimación del ancho mínimo del humedal (W), a partir de la siguiente ecuación:

### **Ecuación 14**

$$W = \frac{A_c}{h};$$

Fuente: (Rabat Blázquez, 2016)

Donde:

W es el ancho mínimo del humedal (m); Ac es el área transversal del humedal (m<sup>2</sup>); H es la profundidad del humedal (m)

Para determinar la longitud máxima de una celda de humedal, fue basado en la ecuación descrita a continuación.

### **Ecuación 15**

$$L = \left[ \frac{A_s \times y^{\frac{8}{3}} + m^{\frac{1}{2}} \times 86400}{a \times Q} \right]^{\frac{2}{3}};$$

Fuente: (Rabat Blázquez, 2016)

Donde:

$A_s$  = Área superficial de la celda de humedal, m<sup>2</sup>;  $y$  es la profundidad del agua en el humedal (m);  $m$  es la pendiente del fondo del lecho, % expresado como decimal;  $a$  es el factor de resistencia, s-m<sup>1/6</sup>;  $Q$  es el caudal, m<sup>3</sup>.d-1.

Cuando la vegetación es típicamente emergente, por lo general, se asume como datos de diseño valores del factor de resistencia ( $a$ ) entre 1.00 s-m<sup>1/6</sup> y 4.00 s-m<sup>1/6</sup> (Crites, Middlebrooks, & Reed, 2006). Para el caso de estudio se ha asumido  $a = 1.00$  s-m<sup>1/6</sup>.

La cantidad de macrofitas a utilizar dependerá en gran medida del tipo de especie, partiendo de esto la ecuación utilizada para la determinación del número de plántulas.

### **Ecuación 16**

$$\text{Número de plantas} = \frac{A_s}{A_{\text{ocupada por la planta}}};$$

Fuente: elaboración propia

Donde:

$A_s$  es el área superficial de la celda de humedal (m<sup>2</sup>);  $A_{\text{ocupada por la planta}}$  es el área por planta a implementar (m<sup>2</sup>).

El análisis del número de macrofitas a utilizar en el sistema está basado en el área ocupada por cada una de las plantas, en comparación con el área superficial disponible en el proceso unitario de tratamiento.

Estimaciones de emisiones de GEI del diseño de humedal artificial superficial

Los sistemas de humedales artificiales son humedales totalmente construidos para el tratamiento de aguas residuales, que aplican varios diseños tecnológicos, utilizando procesos naturales

de humedales, asociados con la hidrología, los suelos, los microbios y las plantas de los humedales. Por lo tanto, los humedales artificiales son sistemas diseñados y construidos para utilizar los procesos naturales que involucran la vegetación de los humedales, los suelos y sus conjuntos microbianos asociados para ayudar en el tratamiento de aguas residuales. Los humedales artificiales descritos en el Suplemento de 2013 a las Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero: Humedales representan una tecnología de tratamiento adicional. Los factores de emisión provistos cubren lo necesario para el humedal propuesto en este estudio.

La metodología descrita a continuación es la necesaria para la estimación de las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O de las aguas residuales domésticas. La misma está definida a parte de un nivel 1, el cual utiliza valores por defectos para su estimación.

Estimación de emisiones de metano

La ecuación general para estimar las emisiones de CH<sub>4</sub> en humedales artificiales, para aguas residuales domésticas, está presentada a continuación:

### **Ecuación 17**

$$\text{Emisiones de CH}_4 = \sum_j (TOW_j \cdot FE_j);$$

Fuente: (IPCC, 2014)

Donde:

Emisiones de CH<sub>4</sub> son las emisiones de metano en el año del inventario, kg CH<sub>4</sub>.año-1;  $TOW_j$  es el total de materia orgánica en las aguas residuales que ingresan al humedal artificial en el año de inventario, kg DBO.año-1;  $FE_j$  es el factor de emisión, kg CH<sub>4</sub>/Kg DBO;  $j$  es el tipo de humedal artificial

Para determinar el factor de emisión a utilizar para la estimación de las emisiones de CH<sub>4</sub>, se empleó la ecuación siguiente:

### Ecuación 18

$$FE_j = B_0 \cdot MCF_j;$$

Fuente: (IPCC, 2014)

Donde:

FE<sub>j</sub> es el factor de emisión, kg CH<sub>4</sub>/Kg DBO; j es el tipo de humedal artificial; B<sub>0</sub> es la capacidad máxima de producción de metano, kg CH<sub>4</sub>/kg DBO; MCF<sub>j</sub> es el factor de corrección del metano depende del tipo de humedal artificial (fracción).

**Tabla 7**

#### Valores de MCF por defecto para aguas residuales domésticas

Tipo de vía o sistema de tratamiento y eliminación	MCF por defecto	Intervalo de confianza
Flujo superficial	0.4	0.08 – 0.7

Fuente: (IPCC, 2014)

La ecuación a utilizar para el cálculo de materia orgánica degradable en el humedal artificial es:

$$TOW_j = P_j \cdot DBO \cdot I \cdot 0.001 \cdot 365;$$

Fuente: (IPCC, 2014)

Donde:

TOW<sub>j</sub>= total de materia orgánica en aguas residuales domésticas tratadas en el humedal artificial en el año de inventario (kg DBO/año); P<sub>j</sub> es la población cuyas aguas residuales son tratadas en el humedal artificial; DBO es la generación de DBO per cápita en el año del inventario (g DBO/perso-

na/día); I= factor de corrección para DBO industrial adicional descargado en alcantarillas.

Estimación de emisiones de N<sub>2</sub>O

Aplicando la metodología para el Nivel 1, la cual aplica valores por defecto para el factor de emisión y los parámetros de actividad. Para el presente caso de estudio algunos datos de actividad serán específicos de la planta de tratamiento, tales como: Nitrato (NO<sub>3</sub>), Amoníaco (NH<sub>3</sub>), los cuales son utilizados para el cálculo del nitrógeno total en el efluente del sistema, el cual es la suma de los resultados de NH<sub>3</sub> y NO<sub>3</sub> en la salida del humedal, calculados teóricamente como la remoción de los mismos.

La ecuación utilizada para estimar las emisiones de N<sub>2</sub>O en el humedal artificial propuesto como tratamiento terciario de las aguas residuales generadas en el recinto universitario UASD Santiago.

$$Emisiones\ de\ N_2O = \sum_j (N_j \cdot FE_j \cdot 44/28);$$

Fuente: (IPCC, 2014)

Donde:

Emisiones N<sub>2</sub>O son las emisiones de N<sub>2</sub>O en el año del inventario, kg N<sub>2</sub>O/año; NT<sub>j</sub> es el nitrógeno total en las aguas residuales domésticas que ingresan al humedal artificial en el año del inventario, kg NT/año; FE<sub>j</sub> es el Factor de emisión, kg N<sub>2</sub>O-NT/kg N; j es el tipo de humedal artificial, para el caso de estudio se propone un humedal artificial de flujo superficial; el factor 44/28 es la conversión de kg N<sub>2</sub>O-NT en kg N<sub>2</sub>O.

El factor de emisión predeterminado para el N<sub>2</sub>O emitido por las aguas residuales domésticas tratadas por humedales artificiales de flujo superficial es 0.0013 kg N<sub>2</sub>O-NT / kg N.

Con relación a la metodología utilizada para el cálculo de la huella de carbono (HdC), se utilizó la siguiente:

$$CO_2e = \sum_{i=1}^n \text{Emisión de } GEI_i \times PCG_i;$$

Fuente: (Vilches, Dávila, & Varela, 2015)

Donde:

CO<sub>2</sub>e son las emisiones en dióxido de carbono equivalente; Emisión de GEI<sub>i</sub> es el Flujo emitido de un determinado GEI; PCG<sub>i</sub> es el Potencial de calentamiento Global del GEI según horizonte temporal; *n* es el número de GEI emitido por la fuente. La metodología de cálculo de la Huella de Carbono del Protocolo de gases de efecto invernadero es usada para conocer las emisiones de GEI y así poder reducir estas emisiones (World Business Council for Sustainable Development, World Resources Institute y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2005).

En el presente estudio el Potencial de Calentamiento Global que corresponde a la categoría llamada usualmente HdC. A partir del Potencial de Calentamiento Global (PCG), con proyección a 100 años, otorgado a cada GEI estimado, tomando en cuenta el Quinto Informe de Evaluación de la IPCC, 2015.

**Tabla 8**

GEI	Fórmula Química	PCG (tCO <sub>2</sub> e)
<b>Dióxido de carbono</b>	CO <sub>2</sub>	1
<b>Metano</b>	CH <sub>4</sub>	34
<b>Óxido nítrico</b>	N <sub>2</sub> O	298

Fuente: (IPCC, 2015)

- **Análisis de resultados**

#### Emisiones de CH<sub>4</sub>

Las emisiones de CH<sub>4</sub> que está generando la planta de tratamiento en cada uno de los componentes evaluados es de 599.12 kg de CH<sub>4</sub>/año, estas presentan una reducción significativa en cada uno de los procesos.

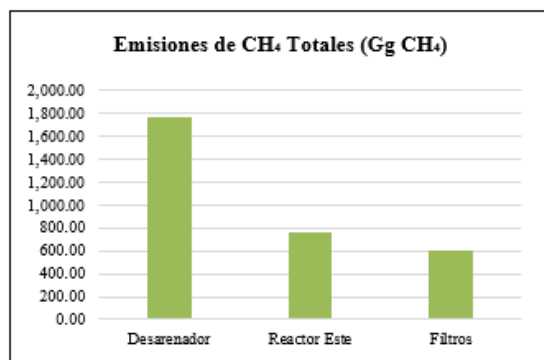


Gráfico 1. Emisiones de CH<sub>4</sub> totales de la PTAR del Recinto UASD-Santiago

Fuente: Elaboración propia

Emisiones de N<sub>2</sub>O los resultados de las emisiones de Óxido Nítrico (N<sub>2</sub>O) en cada uno de los dispositivos de la PTAR, la cual registró valores entre 59.87– 10.40 kg N<sub>2</sub>O/año durante el proceso de tratamiento de la planta. Estas emisiones presentan una demostrada disminución, al pasar por cada uno de los procesos.

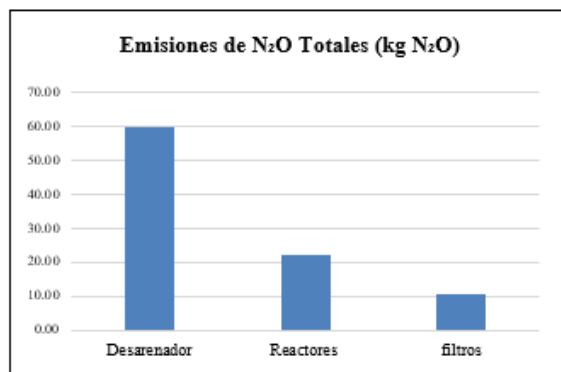


Gráfico 2. Emisiones de N<sub>2</sub>O totales de la PTAR del Recinto UASD-Santiago, enero 2020-marzo 2021

Fuente: elaboración propia

- **Comparación de la huella de carbono con y sin humedal artificial.**

Las emisiones generadas en la entrada a los reactores representan el máximo porcentaje, equivalente a un 57.00% (84,869.09 kg de CO<sub>2</sub>e) ya que en esta etapa del proceso el sistema no había iniciado la remoción de contaminantes. A esto se le adiciona el bajo o nulo consumo de proteínas por parte de las bacterias.

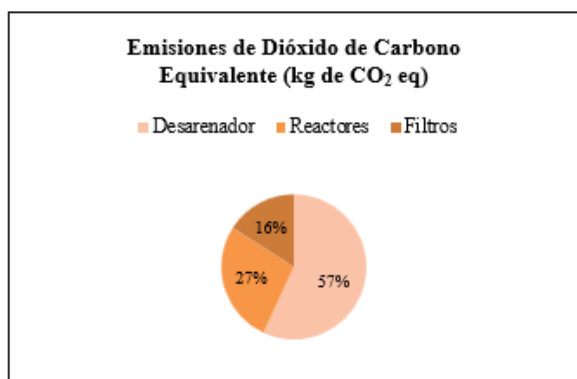


Gráfico 3. Emisiones de CO<sub>2</sub>e totales de la PTAR del Recinto UASD-Santiago, periodo 2020 – 2021

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, a la salida de los filtros, las emisiones presentaron una evidente reducción, evidenciándose un 16.00% menos de emisiones (23,840.02 kg CO<sub>2</sub>e).

Por otro lado, con la incorporación del HA, las emisiones de esta planta de tratamiento de aguas residuales estarían reducidas en un 90% aproximadamente, tal como se aprecia en el gráfico siguiente, lo cual representaría una eficiencia de remoción de contaminantes con un nivel de aceptación excelente a la salida del sistema.

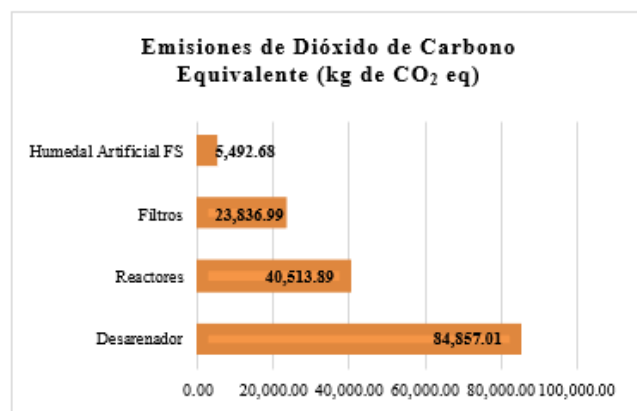


Gráfico 4. Emisiones de Gg CO<sub>2</sub>e totales atendiendo al diseño de humedal propuesto en la PTAR del Recinto UASD-Santiago  
Fuente: Elaboración propia

- **Conclusiones y Recomendaciones**

1. Las emisiones de CH<sub>4</sub> que podrían generarse tanto a la entrada como a la salida del humedal, presentan una reducción de un 60.00% aproximadamente con relación a lo esperado en el sistema convencional.
2. Las emisiones de óxido nitroso a la salida del humedal artificial se estima que estarán en 8.00 kg N<sub>2</sub>O por año, correspondiente a un 23.00% de reducción de emisiones.
3. Con la implementación del humedal artificial, las emisiones de CO<sub>2</sub>e serán reducidas en un 90% aproximadamente, lo cual representaría una eficiencia de remoción de contaminantes con un nivel de aceptación excelente a la salida del sistema.

4. Con la incorporación del HA, se tendrá una solución eficaz, económica y de alto valor agregado en el tratamiento de las Aguas Residuales del Recinto universitario UASD Santiago.

• **Recomendaciones.**

a. Diseñar el proceso unitario de la planta para la separación de lodos, para poder estimar la cantidad de lodos generados por la planta de tratamiento.

b. Estimar las emisiones de CH<sub>4</sub> concerniente al manejo de los lodos del sistema de tratamiento.

c. Realizar un mayor número de mediciones de parámetros químicos tales como: DBO<sub>5</sub>, DQO, NT, dentro del sistema de tratamiento.

d. Plantear como caso de estudio la determinación del factor de emisión del sistema tanto para el CH<sub>4</sub> como para el N<sub>2</sub>O en el sistema convencional de la PTAR.

e. Medir la absorción de CO<sub>2</sub> de la parte arbórea que rodea el sistema y de las macrofitas del humedal artificial, para ver la disminución de la HdC del sistema.

• **Citas Bibliográficas.**

Esrey, S. A., Gough, J., Rapaport, D., Sawyer, R., Simpson-Hébert, M., Vargas, J., & Winblad, U. (1999). *Sanearamiento Ecológico* (1. ed. en español). Estocolmo, Suecia: México, D.F.: Sida; Friedrich Ebert Stiftung.

Asprilla, W. J., Ramírez, J. S., & Rodríguez, D. C. (2020). Humedales artificiales de flujo subsuperficial: comparación de metodologías de diseño para el cálculo del área superficial basado en la remo-

ción de materia orgánica. *Ingenierías USBmed*, 65-73. Obtenido de <file:///C:/Users/CEDAF/Downloads/Dialnet-HumedalesArtificialesSubsuperficiales-7973095.pdf>

Avellán, T., & Gremillion, P. (2019). Constructed wetlands for resource recovery in developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42-57.

Bani Shahabadi, M., Yerushalmi, L., & Haghghat, F. (2010). "Estimation of Greenhouse Gas Generation in Wastewater Treatment Plants - Model Development and Application. *Chemosphere*.

Cadwallader, A., & VanBriesen, J. M. (2017). Incorporating Uncertainty into Future Estimates of Nitrous Oxide Emissions from Wastewater Treatment. *Journal of Environmental Engineering*, 1-10. Obtenido de <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%29EE.1943-7870.0001231>

Campos, J. L., Valenzuela-Heredia, D., Pedrouso, A., Val del Río, A., Belmonte, M., & Mosquera-Corral, A. (2016). Greenhouse Gases Emissions from Wastewater Treatment Plants: Minimization, Treatment, and Prevention. *Journal of Chemistry*, 12 páginas. Obtenido de <https://www.hindawi.com/journals/jchem/2016/3796352/>

Carvajal Arias, C. E., Ortiz, P., & Vega Beltrán, A. L. (2017). Propuesta de tratamiento de aguas residuales domésticas implementando un humedal artificial de flujo subsuperficial empleando bambusa sp en la finca el recreo ubicada en Tauramena, Casanare. *Revista de Tecnología*, 65-76. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6546150.pdf>

- Crites, R. W., Middlebrooks, J., & Reed, S. C. (2006). *Natural Wastewater Treatment Systems*. Boca Raton, FL: CRC Press. Obtenido de <http://amac.md/Biblioteca/data/30/14/10/87.2.pdf>
- David Sánchez Ramos, G. S. (2018). Humedales de tratamiento y reutilización de aguas residuales. En [http://www.castillalamancha.es/sites/default/files/documentos/pdf/20181106/segundo\\_informe\\_efectos\\_cambio\\_climatico\\_clm\\_parte2.pdf](http://www.castillalamancha.es/sites/default/files/documentos/pdf/20181106/segundo_informe_efectos_cambio_climatico_clm_parte2.pdf),
- Estudio sobre efectos constatados y percepción del Cambio Climático en el medio rural de Castilla-La Mancha. Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2011). Ficha Técnica. Sistema de Información del Medio Ambiente. Nitrógenos totales. Bogotá, Colombia. Obtenido de [https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/Nitrogenos\\_totales\\_13.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/Nitrogenos_totales_13.pdf)
- Farrell , A. E., Kerr, A. C., Brandt , A. R., Tom, M. S., & Franco, G. (2005). *Research Roadmap for Greenhouse Gas Inventory Methods*. California: California Energy Commission. Obtenido de [https://www.ocf.berkeley.edu/~akerr/socrates/projects/CEC-2005\\_GHG-inventory-methods.pdf](https://www.ocf.berkeley.edu/~akerr/socrates/projects/CEC-2005_GHG-inventory-methods.pdf)
- Fu, X., Wu, X., Zhou, S., Chen, Y., Chen, M., & Chen, R. (2018). Un sistema de humedales construido para el tratamiento de aguas residuales de hogares rurales en regiones subtropicales. *Water*, 12.
- Google LLC. (2021). Google Earth Pro.
- Gupta, D., & Singh, S. (2012). Greenhouse Gas Emissions from Wastewater Treatment Plants: A Case Study of Noida. *Journal of Water Sustainability*, 131-139. Obtenido de <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=7e1a197ab80afe-0123f65ea330fcb4d11585f008>
- Hammel, B., Grayum, M., Herrera, C., & Zamora, N. (2003). *Manual de plantas de Costa Rica*. Missouri Botanical Garden, INBio, Museo Nacional de Costa Rica. Estados Unidos: Museo Nacional de Costa Rica.
- Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., Van der Linden, P. J., Dai, X., . . . Johnson, C. A. (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press. Cambridge, Inglaterra.
- IPCC. (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Tratamiento y eliminación de aguas residuales*. IGES, Japón. Obtenido de [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/5\\_Volume5/V5\\_6\\_Ch6\\_Wastewater.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/5_Volume5/V5_6_Ch6_Wastewater.pdf)
- IPCC. (2014). *2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands*. Switzerland: Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, T.G.
- IPCC. (2015). *Fifth Assessment Report - Synthesis Report by IPCC - issuu, IPCC. Climate Change 2014, Synthesis Report*. (R. Pachauri, & L. Meyer, Edits.) Suiza: IPCC. Obtenido de [https://issuu.com/unipcc/docs/syr\\_ar5\\_final\\_full\\_wcover](https://issuu.com/unipcc/docs/syr_ar5_final_full_wcover)
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands*. Boca Ratón, Florida: Taylor & Francis Group. Obtenido de <https://sswm.info/sites/default/>

files/reference\_attachments/KADLEC%20WAL-LACE%202009%20Treatment%20Wetlands%202nd%20Edition\_0.pdf

Kan, S., Nawab, J., & Waqas, M. (2020). Constructed Wetlands: A CleanGreen Technology for Degradation and Detoxification of Industrial Wastewaters. En *Bioremediation of Industrial Waste for Environmental Safety* (págs. 127-163). Springer, Singapur: Bharagava, R.N., Saxena, G. (eds.).

Lara Borrero, J. A., & Vera Puerto, I. L. (2005). Implantación y evolución de un humedal artificial de flujo subsuperficial en Cogua, Cundinamarca, Colombia. *Ingeniería y Universidad*, 47-63. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47720781003>

Lara, C.R., Díaz, J., Usaquén, O.L., & Forero, L. (1997). Postratamiento de efluente de un reactor UASB por medio de un humedal artificial. *UniBoyacá*, 277-294. Obtenido de [https://www.rds.org.co/aa/img\\_upload/2c3473c46134962901b3d566d2945318/Humedal\\_artificial\\_tratamaguas14\\_1\\_.pdf](https://www.rds.org.co/aa/img_upload/2c3473c46134962901b3d566d2945318/Humedal_artificial_tratamaguas14_1_.pdf)

Lombard-Latune, R., & Molle, P. (2017). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas domesticas en zona tropical: Guia de dimensionamiento para zonas tropicales. Francia: Agencia Francesa de la Biodiversidad. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/338429238\\_Humedales\\_artificiales\\_para\\_el\\_tratamiento\\_de\\_aguas\\_residuales\\_domesticas\\_en\\_zona\\_tropical\\_Guia\\_de\\_dimensionamiento\\_para\\_zonas\\_tropicales](https://www.researchgate.net/publication/338429238_Humedales_artificiales_para_el_tratamiento_de_aguas_residuales_domesticas_en_zona_tropical_Guia_de_dimensionamiento_para_zonas_tropicales)

Ministerio de Economía, Planificación y Desarrollo (MEPyD). (2016). Informe Nacional sobre Vivienda y Desarrollo Urbano Sostenible. Santo Domingo: Together Towards, Habitat III. Obtenido de <https://mepyd.gob.do/wp-content/uploads/drive/VIMICI/Publicaciones%20e%20Informes/Publicaciones/informe-habitat-3.pdf>

mepyd.gob.do/wp-content/uploads/drive/VIMICI/Publicaciones%20e%20Informes/Publicaciones/informe-habitat-3.pdf

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (Septiembre de 2012). Norma Ambiental sobre Control de Descargas a Aguas Superficiales, Alcantarillado Sanitario y Aguas Costeras. Santo Domingo, República Dominicana. Obtenido de <http://ambiente.gob.do/files/Norma-Ambiental-sobre-Control-de-Descargas-a-Aguas-Superficiales-alcantarillado-sanitario-y-aguas-costeras.pdf>

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Consejo Nacional para el Cambio Climático y Mecanismo de Desarrollo Limpio y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2020). Primer Informe Bienal de Actualización de la República Dominicana ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Santo Domingo, República Dominicana.

Pérez, Y. A., García-Cortes, D., & Jauregui-Haza, U. J. (2022). Humedales construidos como alternativa de tratamiento de aguas residuales en zonas urbanas: una revisión. *Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente*. doi:<https://doi.org/10.7818/ECOS.2279>

Rabat Blázquez, J. (Junio de 2016). Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración. España: Universidad de Alicante. Obtenido de [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/57213/1/Analisis\\_de\\_los\\_modelos\\_de\\_diseno\\_de\\_los\\_sistemas\\_na\\_Rabat\\_Blazquez\\_Jorge.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/57213/1/Analisis_de_los_modelos_de_diseno_de_los_sistemas_na_Rabat_Blazquez_Jorge.pdf)

Ramírez Melgarejo, M. G. (Noviembre de 2020). Propuesta Metodológica para Estimar N2O en In-

---

ventarios de Emisión y Evaluaciones de Eco-Eficiencia en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. Barcelona, España: Universitat Politècnica de Catalunya.

Rigotti, J. A., Pasqualini, J. P., & Ribeiro Rodrigues, L. (2020). Nature-based solutions for managing the urban surface runoff: an application of a constructed floating wetland. *Limnetica*, 441-454.

Romero - Aguilar, M., Colín - Cruz, A., Sánchez - Salinas, E., & ORtiz - Hernández, M. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 157 - 167. Obtenido de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_art-text&pid=S0188-49992009000300004](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_art-text&pid=S0188-49992009000300004)

Romero Rojas, J. A. (1999). *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principios de Diseño*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería. Obtenido de <https://idoc.pub/documents/tratamiento-de-aguas-residuales-teoria-y-principios-de-diseo-jairo-alberto-romero-rojaspdf-d4p7qr82e64p>  
Sawyer, C. N., McCarty, P. L., & Parkin, G. F. (2001). *Química para Ingeniería Ambiental*. Colombia: McGraw Hill.

Thomsen, M., & Lyck, E. (2005). *Emission of CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O from Wastewater Treatment Plants (6B)*. Denmark: National Environmental Research Institute. Obtenido de [https://www2.dmu.dk/1\\_viden/2\\_publicationer/3\\_arbrapporter/rapporter/ar208.pdf](https://www2.dmu.dk/1_viden/2_publicationer/3_arbrapporter/rapporter/ar208.pdf)  
Universidad Autónoma de Santo Domingo, recinto Santiago. (2004). *Plano General del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales*. Santiago, República Dominicana.

Vásquez de la Cruz, D., Peralta Almonte, J., & Moronta Romano, Y. A. (octubre de 2018). *Curso Equivalente a Tesis de Grado. Evaluación Diagnóstica de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales UASD Santiago y San Felipe de Puerto Plata*. San Francisco de Macorís, Duarte, República Dominicana.

Von Münch, E. (2009). *Humedales Artificiales para el tratamiento de aguas grises y aguas residuales domésticas en países en desarrollo*. GIZ, ECOSAN, 1-27. Obtenido de <http://www.rotaria.net/peru3/rotaria/files/Manual%20Humedal.pdf>