



Tratamiento de aguas grises claras en paredes verdes:

**Seguimiento de parámetros
físicoquímicos y análisis
con espectrofotometría**

**Instituto de Estudios Ambientales IDEA
Universidad Nacional de Colombia
Sede Medellín**

2021

Contenido

Presentación.....	1
Clasificación las aguas Residuales.....	2
¿Por qué tratar el agua gris clara en una pared verde?	3
Evaluación experimental.....	4
Área de Estudio.....	4
Agua gris clara sintética	4
Especies utilizadas.....	5
¿Cómo se toman las mediciones espectrales?.....	8
Resultados	8
Contaminantes orgánicos degradados gracias a las plantas.....	8
Eliminación de nutrientes de las aguas grises claras	9
Área foliar.....	11
Evaluación espectrofotométrica.....	11
¿Cómo se interpretan las gráficas?	12
¿Cómo se hallan los índices de vegetación?	12
¿Cómo pueden ser interpretados los valores de NDVI?.....	13
¿Por qué es importante el NDVI en paredes verdes?	14
Conclusiones	14
Recomendaciones	14
Bibliografía	16
Glosario.....	18

Presentación

El estado actual del agua en el mundo genera alertas sobre la disponibilidad del recurso en el futuro. En Colombia una persona consume diariamente cerca de 127 L de agua, de los cuales hasta el 84% puede llegar a ser agua gris (Niño *et al.* 2006). Los sistemas de tratamiento de aguas residuales a nivel nacional no tratan el 100% del agua residual generada según un informe de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios en 2019 por lo que gran cantidad de esta agua termina siendo vertida en condiciones no óptimas.

Las aguas grises tienen contaminantes orgánicos y concentraciones importantes de nutrientes como Fósforo y Nitrógeno que cuando no se tratan generan grandes impactos ambientales negativos en las fuentes hídricas. Paradójicamente, mientras las fuentes hídricas se degradan por acumulación de nutrientes (MPCA, 2008), a nivel global elementos como el Fósforo empiezan a escasear para uso principalmente en fertilizantes (Alewell *et al.* 2020).

En un sistema de tratamiento con plantas, a medida que las aguas grises reducen la cantidad de contaminantes orgánicos y nutrientes, las plantas generan grandes beneficios ecosistémicos al permitir el cierre de ciclos biogeoquímicos de elementos importantes como el nitrógeno y fósforo.

A lo largo de esta cartilla se quiere mostrar cómo las aguas grises claras pueden ser tratadas gracias a la acción de las plantas en una pared verde y cómo es posible evaluar el efecto de estas en las plantas gracias al uso de la espectrofotometría.

¿Cómo se clasifican las aguas Residuales?

Las aguas residuales¹ municipales se componen principalmente de **aguas residuales domésticas**. Estas aguas están divididas a su vez en **aguas negras** y **aguas grises**.

Las primeras son las aguas que salen del inodoro compuestas por grandes cantidades de materia orgánica, heces y orina. Y las **aguas grises** son aquellas que vienen de duchas, bañeras, lavamanos, lavadora y cocina.

Las aguas grises se pueden dividir dependiendo del grado de contaminación que tienen. Allí encontramos las **aguas grises oscuras** (AGO), que vienen del lavado de ropa, la cocina y lavaplatos, y **aguas grises claras** (AGC) que vienen principalmente de la ducha y lavamanos.

Las aguas que provienen de la cocina y lavaplatos aportan entre 40%-60% de los contaminantes encontrados en las aguas grises (Larsen *et al.* 2013). Por lo que las otras aguas menos contaminadas pueden ser tratadas con mayor facilidad y reusadas.

¿Cómo se mide el grado de contaminación de las aguas residuales?

Los **parámetros**² que ayudan a establecer la **calidad** de las aguas residuales se dividen en: **parámetros físicos** y **parámetros químicos**. Los primeros son temperatura, el olor, los sólidos suspendidos totales SST³, turbiedad⁴, color, y los parámetros químicos son pH⁵, Demanda Química de

oxígeno (**DQO**), Demanda Biológica de Oxígeno (**DBO**), Nitrógeno⁶, Fósforo⁷, etc. Y los parámetros microbiológicos estarían dados por la cantidad de mesófilos⁸ presentes en las aguas.

La **DBO** mide la cantidad de oxígeno requerida para **degradar bioquímicamente** la cantidad de materia orgánica⁹ presente en el agua, es útil para la medición indirecta de la contaminación orgánica del agua. La **DQO** es la cantidad de oxígeno que se requiere para **oxidar**¹⁰ la materia orgánica presente en el agua, en la DQO se incluye la demanda de oxígeno creada tanto por sustancias biodegradables¹¹ como no biodegradables. Entre **mayor** sea la DBO o DQO mayor grado de contaminación tienen las aguas. La degradación de la materia orgánica en las aguas residuales puede darse por una oxidación aerobia en la que las bacterias consumen materia orgánica y generan productos como metano, dióxido de carbono, amonio¹² y agua (Tebbutt 1998), en **humedales**¹³ este proceso se potencia gracias a la **presencia de las plantas** (Armstrong *et al.* 1990).

El **Nitrógeno** es un factor importante en las aguas residuales ya que es dispuesto en ellas de muchas maneras (Amonio, nitrato, nitrito), la descarga de aguas con altos contenidos de Nitrógeno genera problemas de oxígeno en las aguas y favorece efectos tóxicos (Van den Berg & Ashmore 2008). La **eliminación** de nitrógeno de las aguas residuales viene mediana por dos procesos fundamentales: la **nitrificación**¹⁴ y la **desnitrificación**. En la nitrificación el amonio se oxida a nitrito y posteriormente se oxida a nitrato (Ramalho 1996). Y la desnitrificación es un proceso anaerobio llevado a cabo por bacterias desnitrificantes¹⁵ (Ni *et al.* 2016), las cuales dan como resultado la liberación de nitrógeno amoniacal¹⁶ a partir de nitritos y nitratos

El **fosforo** se encuentra en el ambiente principalmente de forma inorgánica y orgánica,

dentro del **ciclo biogeoquímico**¹⁷ del fósforo son los microorganismos solubilizadores de fosfato (PSMs) los encargados de la bio disponibilidad de este elemento por la mineralización del fósforo orgánico y la solubilización del fósforo inorgánico (Gross *et al.* 2020 & Liang *et al.* 2021). Las **plantas pueden captar fósforo** del ambiente y almacenar fosfatos en la pared celular (Verma & Dougall 1979).

¿Por qué tratar el agua gris clara en una pared verde?

El uso de plantas para el tratamiento de aguas residuales no es novedoso, los **humedales construidos**¹⁸ tratan aguas haciendo uso de los requerimientos nutricionales de algunas plantas y las propiedades filtrantes de los suelos, pero requiere de mucho espacio (Huang, Chen & Xu 2013).

El tratamiento de **aguas menos contaminadas** puede ser llevado a cabo en espacios más limitados tomando las propiedades de los humedales y llevándolas a zonas urbanas o zonas descentralizadas. Rysulova *et al.* 2017 sugiere el uso de **jardines verticales** como modificaciones a humedales construidos en los que los sistemas se componen de **biofiltros**¹⁹ y **plantas**. Los jardines verticales podrían estar incluidos dentro de las paredes verdes, las cuales difieren de las fachadas verdes en que las paredes incluyen tecnologías y soportes que permiten gran variedad de plantas a lo largo de la superficie mientras que las fachadas usan enredaderas que cubren la pared y las raíces van desde el piso (aunque no siempre es así). Las paredes verdes o paredes vivas pueden ser continuas o **modulares**²⁰, estas últimas permiten la separación de las plantas en bandejas, bolsas flexibles u otros.



Figura 1. Pared viva modular, tomada de Masi *et al.* 2016

Las paredes verdes son una excelente opción para el tratamiento de aguas grises, especialmente aguas grises claras por varios motivos: 1. Favorece la **recirculación** o reúso del agua. 2. Este sistema utiliza **energía solar**, las plantas son quienes favorecen el proceso de descontaminación y sólo requieren luz solar. 3. Integración de nutrientes al **ciclo biogeoquímico** a través de las plantas, esto permite que menos nutrientes se acumulen en el agua y recirculen en el ambiente.

¿Cómo saber si las aguas grises claras afectan las plantas?

Existen muchos métodos directos e indirectos. La espectrometría²¹ como base para el cálculo de Índices de vegetación de diferencia normalizada o **NDVI**²² ha sido utilizado ampliamente en la detección remota de deficiencias nutricionales en cultivos. **¿Cómo es esto posible?** gracias a la interacción de la radiación solar con el tejido vegetal de las hojas de las plantas es posible definir la reflectancia²³ en el espectro visible (VIS), infrarrojo (IR) y cercana al infrarrojo (NIR) (Brizuela-Amador *et al.* 2007). De esta forma el NDVI nos da una **estimación cuantitativa** del crecimiento y la biomasa vegetal (Arabameri & Pourghasemi 2019).

Lo más importante es que estos índices nos darán información clave sobre el estado nutricional de las plantas **antes** de que estas presenten síntomas o afecciones visibles.

Evaluación experimental

Se desarrollaron una serie de experimentos que permitieran comprobar el efecto positivo que algunas especies de plantas pueden tener sobre las aguas grises claras y el compromiso nutricional o de salud que las plantas podrían tener a mediano y largo plazo.



Figura 2. Plantas ubicadas en laboratorio de Geomática

Área de Estudio

Los experimentos fueron desarrollados en el Laboratorio de Geomática (Bloque 14) del campus el Volador de la **Universidad Nacional de Colombia sede Medellín**. Los datos relacionados a la altura y la radiación se obtuvieron del mapa de irradiación del IDEAM (IDEAM 2014).

Latitud: 6.261406°

Longitud: -75.57633°

Altura aproximada: 1460-1490 msnm.

Temperatura anual promedio: 19°C

Radiación solar aproximada: 4,2-4,8 KWh/m²

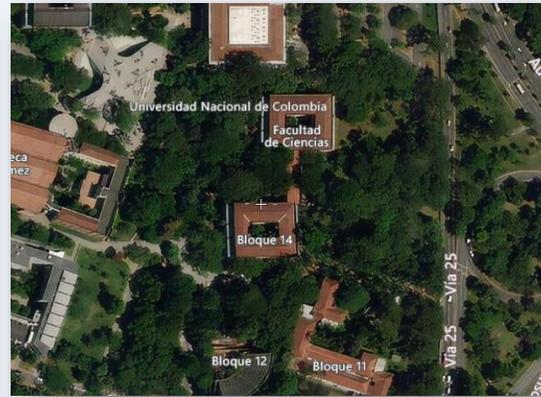


Figura 3. Ubicación del laboratorio en el que se desarrollaron los experimentos.

Agua gris clara sintética

Las aguas grises claras pueden ser aquellas que vienen del lavamanos o aquellas que vienen de la ducha, para esta evaluación se formularon aguas grises claras que vienen del lavamanos (Una persona en Colombia produce en promedio 10 L de agua gris clara en el lavamanos al día). Con el fin de hacer el experimento replicable, se formularon aguas grises claras sintéticas modificando las especificaciones de *Diaper et al 2008*.

Se usaron los siguientes compuestos

Tabla 1. Formulación de Aguas grises claras sintéticas

Ingrediente	Producto usado	Cantidad en 10 L (g)
Bloqueador solar	Nivea	0.3
Crema humectante	Lubriderm	0.4

Jabón	Protex antimicrobiano	2.5
Arcilla	Grado analítico	0.2
$NaHCO_3^{24}$	Grado analítico	0.4
Antibacterial	Bacterion	0.5
Efluente*	-	1,5 L

*El efluente corresponde al agua gris clara obtenida exclusivamente del lavado bucal, en el que se usaron 2,1 g de pasta dental en 1,5L de agua.

Y se obtuvieron las aguas grises claras sintéticas con los parámetros de la Tabla 2

Tabla 2. Resultado caracterización de las aguas grises claras sintéticas

Parámetro	Valor inicial
DQO (mg/L O ₂)	640
Fósforo total (mg P/L)	0,835
Nitrógeno amoniacal (mg NH ₃ -N/L)	3,36
SST (mg/L)	68
pH (Unidades de pH)	8,23
Mesófilos totales (UFC/ mL)	1,6 x 10 ⁶

Especies utilizadas

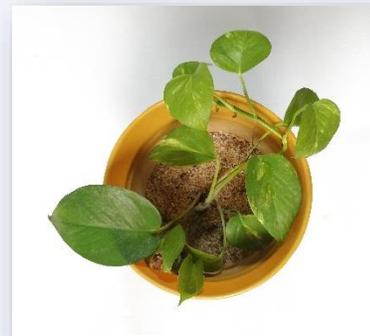
Se utilizaron especies que tuvieran alguna relación con el mejoramiento del agua o que crecieran en suelos contaminados. Las plantas seleccionadas son fáciles de obtener en [Medellín](#) y son comunes en fachadas, paredes verdes o jardines verticales por su

crecimiento como enredaderas o trepadoras. Las especies que se utilizaron son las siguientes:

Cissus rhombifolia



Epipremnum aureum



Hedera hélix



Thunbergia grandiflora



El suelo funciona como un **biofiltro** en la naturaleza, en la que los microorganismos presentes juegan un papel importante en la degradación de contaminantes orgánicos²⁵. Para evaluar sólo el efecto que la planta tiene sobre el mejoramiento de la calidad del agua se usó la arena de sílice o cuarzo malla 8-12 (Figura 4) la cual simula propiedades del suelo bajo condiciones controladas al ser un medio inerte.



Figura 4. Arena de sílice utilizada en el experimento

Las plantas se dejaron 10 días sembradas en arena de sílice antes de regarse con agua gris clara para que se aclimataran²⁶.

Efecto de las plantas en la remoción de nutrientes y contaminantes orgánicos y el efecto de las aguas grises sobre el estado de las plantas

Las plantas se siembran en las materas con arena de sílice. Para la evaluación del efecto de las plantas sobre la **calidad del agua**²⁷, se riegan diariamente con agua clara que se contiene en el recipiente 2, y luego se recircula por la materia dos veces más para asegurar suficiente tiempo de contacto entre a raíz y el agua, igualmente para el control que es sólo cuarzo o arena de sílice. El proceso se lleva a cabo durante 9 días y se toman muestras cada 3 días para evaluar los cambios que tiene el agua.

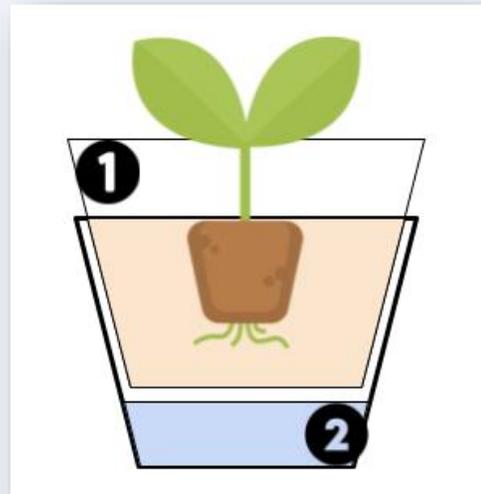


Figura 5. Montaje para la toma de muestras y evaluación de nutrientes, en el esquema de la izquierda se muestra la matera perforada 1 en donde se contenía la arena de sílice y la planta y la matera 2 en donde se recogían las aguas grises claras que pasaban por la arena

El esquema general del diseño experimental se muestra en la Figura 6.

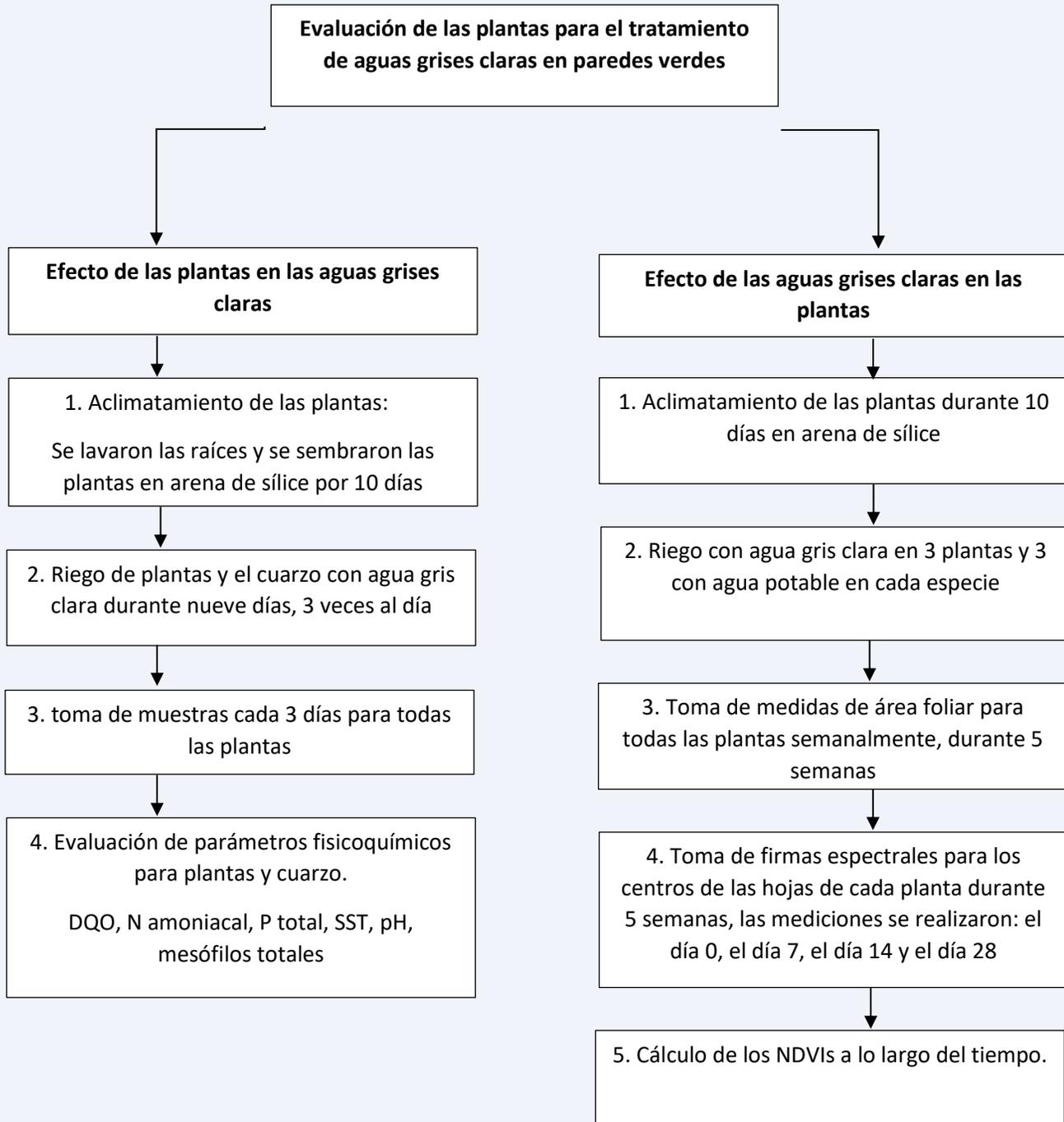


Figura 6. Esquema general de la dirección del diseño experimental

¿Cómo se toman las mediciones espectrales?

Se toman con ayuda del **espectrofotómetro**²⁸ (Figura 7), teniendo una altura constante para cada medición y asegurando radiación suficiente



Figura 7. Montaje del experimento con el espectrofotómetro

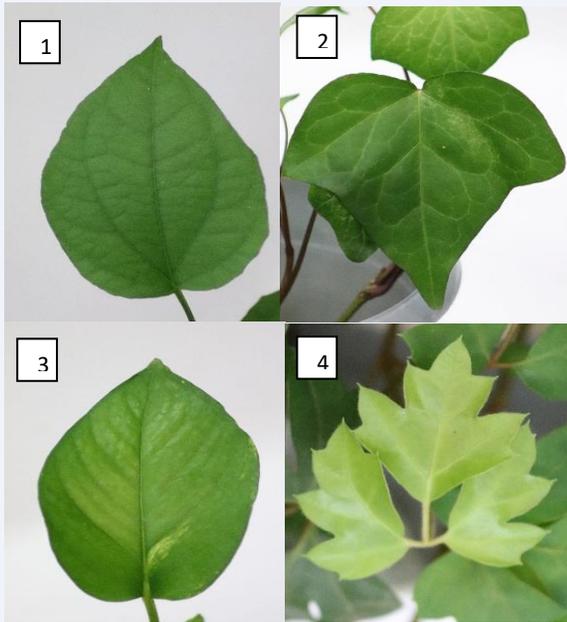


Figura 8. Hojas de 1. *Thunbergia* 2. *Hedera*, 3. *Epipremnum* y 4. *Cissus*

Las **firmas espectrales**²⁹ permiten la obtención de datos para la reflectancia y con este dato se calculan los diferentes índices de vegetación. Con el espectrofotómetro también se obtienen firmas espectrales características para cada especie, que pueden decirnos a nivel visual que deficiencias podría estar presentando la planta. Las firmas se toman para los centros de las hojas de la Figura 8.

Resultados

Contaminantes orgánicos degradados gracias a las plantas

Todas las plantas y el cuarzo removieron contaminantes orgánicos, medidos con la DQO³⁰. Entre más alta la DQO mayor cantidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos tienen las aguas.

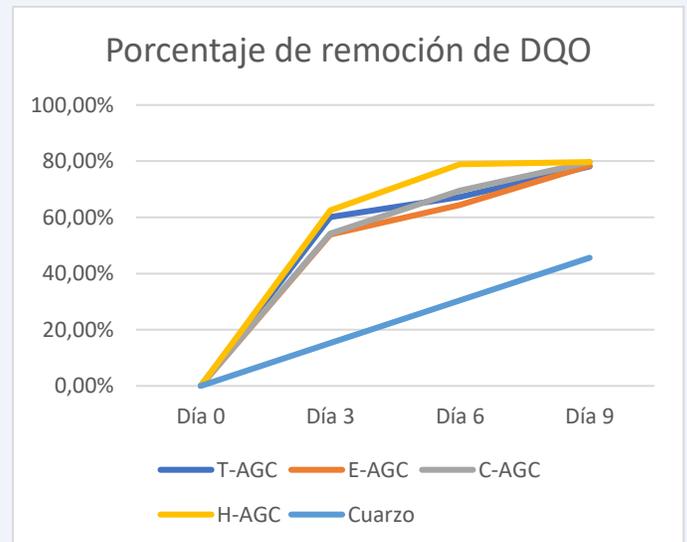


Figura 9. Porcentaje de remoción de DQO para las aguas tratadas en *Thunbergia* (T-AGC), *Epipremnum* (E-AGC), *Cissus* (C-AGC), *Hedera* (H-AGC) y arena de sílice

Pero no todos eliminaron la misma cantidad de contaminantes, mientras que la eficiencia de la arena

de sílice estuvo cerca al **40%**, todas las plantas estuvieron cerca del **80%**. Mostrando que el uso de plantas con medios usualmente utilizados como filtros puede **augmentar la eficiencia** en remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos.

El cuarzo remueve contaminantes orgánicos por medio de la **filtración**³¹ (Juniar *et al.* 2016), mientras que las plantas ayudan al proceso de oxidación de la materia orgánica **oxigenando**³² el **medio** gracias a la acción de las raíces (Cheng *et al.* 2009). De ahí el que en todas las plantas se hubiera dado un efecto positivo y con eficiencias superiores a la arena de sílice.

¿Cómo puedo saber qué tan rápido se degradan los contaminantes orgánicos con las plantas?

Cuando la eliminación de un contaminante se da con un comportamiento logarítmico, es posible modelar y predecir el tiempo necesario para llegar hasta una concentración determinada o deseada de contaminante, esto se da gracias al entendimiento de la **cinética de la reacción**³³. Las especies evaluadas se adaptaron a **modelos cinéticos**³⁴ de **Michaelis-Menten** y fue *Cissus rhombifolia* quien mejor comportamiento presentó. Se necesitaron **9 horas** para remover cerca del 80% de DQO con las plantas. Entre más plantas, menor será el tiempo.

Eliminación de nutrientes de las aguas grises claras

El principio para la eliminación de nutrientes del agua por medio de las plantas está en el entendimiento del ciclo biogeoquímico de estos elementos, como Nitrógeno y fósforo (Figura 10 y Figura 11)

La arena de sílice puede ayudar a eliminar fósforo ya que los compuestos ricos en sílice han demostrado rendimientos positivos a la hora de **adsorber**³⁵ fósforo (Wang *et al.* 2009 and Matichenkov *et al.* 2017), pero **las plantas captan fósforo** para integrarlo a sus estructuras celulares generando un aumento en la remoción de este elemento del agua.

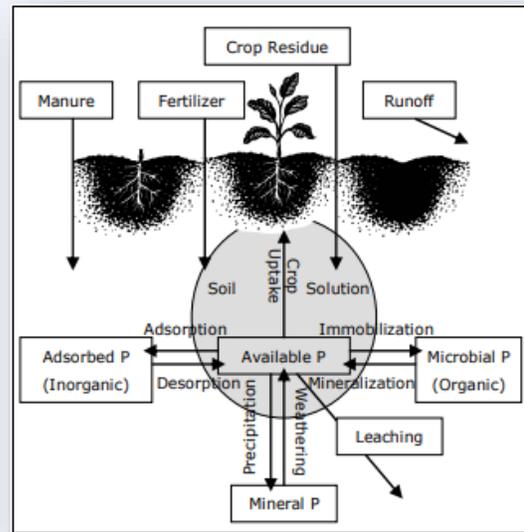


Figura 10. Ciclo biogeoquímico del fósforo en plantas.

Tomada de <http://nmsp.cals.cornell.edu/publications/factsheets/factsheet12.pdf>

Cissus rhombifolia tiene una gran capacidad para captar fósforo al eliminar cerca del **57%** del fósforo del agua gris clara, presentando **eficiencias más altas** que algunos humedales construidos (Villaseñor *et al.* 2014), y *Epipremnum aureum* puede remover hasta un **49%**. Pero no todas las especies captan nutrientes, algunas como *Hedera helix* aumentan la concentración de fósforo en el agua y ¿por qué? Posiblemente por bacterias asociadas a sus raíces (Remacle 1972) que tienen mayor capacidad para solubilizar el fósforo³⁶ y la planta al tener un bajo requerimiento de este

nutriente no lo capta generando así un aumento en la concentración de este elemento en el agua.

¿Por qué puede aumentar la concentración de fósforo en el agua en tratamientos con plantas?

Se pueden dar aumentos ya sea por la liberación de enzimas³⁷ extracelulares (mineralización bioquímica del fósforo³⁸)(Ingle & Padole 2017).

También por la liberación de fósforo al hidrolizar³⁹ contaminantes orgánicos o por la solubilización o mineralización de este nutriente desde sus formas orgánicas e inorgánicas presentes en el agua (Richardson & Simpson 2011)

Es por eso por lo que se hace necesario elegir una planta con altos requerimientos de fósforo (como *Cissus*) para garantizar que el fósforo disponible en el medio sea captado y el agua reduzca la concentración de este contaminante.

Respecto al nitrógeno amoniacal, es importante saber que, aunque el nitrógeno hace parte fundamental en los procesos de las plantas, no todas pueden captarlo por si solas. Como sucede en los humedales, son las bacterias las principales encargadas de la remoción de nitrógeno (Collison & Grismer). Se encontró que *Thunbergia* puede remover hasta un 16% de nitrógeno amoniacal, mientras que *Hedera* puede remover hasta un 8%.

La arena de sílice no tiene ningún efecto sobre la cantidad de nitrógeno amoniacal en el agua, y especies como *Cissus* presentaron aumentos en la concentración de este nutriente en el agua. Los aumentos en la cantidad de nitrógeno amoniacal se deben a procesos como la amonificación⁴⁰, la cual se da gracias a que organismos asociados al suelo y las raíces disuelven algunos compuestos generando amonio (Romillac 2019) como por ejemplo la hidrólisis de la urea. Al ocurrir esto la concentración de nitrógeno amoniacal aumenta en el agua. Un factor adicional está en la fijación de nitrógeno gracias a las bacterias asociadas a las raíces de las plantas. *Cissus* aumenta la concentración de nitrógeno amoniacal en el suelo hasta en un 16,7%

Las reducciones en la cantidad de nitrógeno en el agua residual se dan por el efecto de la nitrificación, en la que se da la transformación inicial del nitrógeno amoniacal y posteriormente se debe dar la desnitrificación en donde las bacterias desnitrificantes ayudan a cerrar el ciclo biogeoquímico al transformar nitritos y nitratos en nitrógeno amoniacal (Wei *et al.* 2019).

Pero para que el nitrógeno amoniacal sea eliminado del agua y el nitrógeno pueda cerrar el ciclo biogeoquímico es muy importante garantizar las condiciones adecuadas.

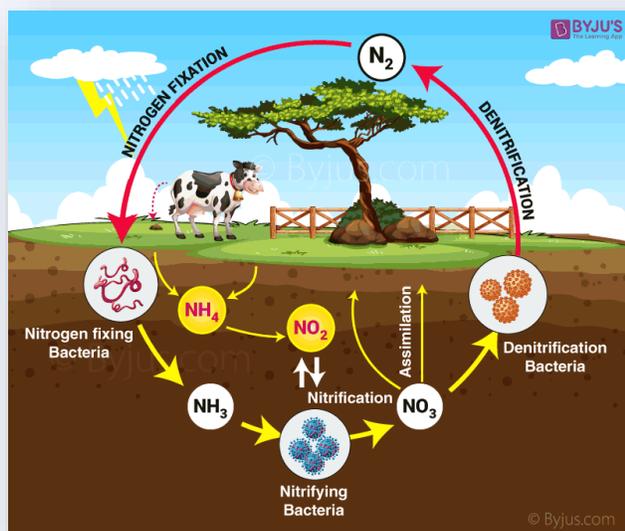


Figura 11. Ciclo biogeoquímico nitrógeno en plantas.

Tomada de: <https://byjus.com/biology/nitrogen-cycle/>

¿Cómo se garantiza una captación o eliminación alta de nitrógeno amoniacal?

Lo primero que debe hacerse es permitir un **alto tiempo de contacto entre el agua y la planta**, entre más interacción tenga el agua con la raíz mejor será la remoción. También es necesario generar **condiciones anóxicas** (espacios sin oxígeno) para permitir que las bacterias desnitrificantes puedan transformar los nitritos y nitratos en nitrógeno atmosférico⁴¹. Y, por último, es importante que el medio tenga un contenido de carbono⁴² significativo para propiciar el crecimiento de microorganismos asociados a estos procesos (la fibra de coco es un buen ejemplo). Las bajas eficiencias en cuanto a la remoción de nitrógeno halladas en esta evaluación experimental responden a un medio inerte⁴³ sin contenido de carbono, sin espacios anóxicos y bajos tiempos de retención.

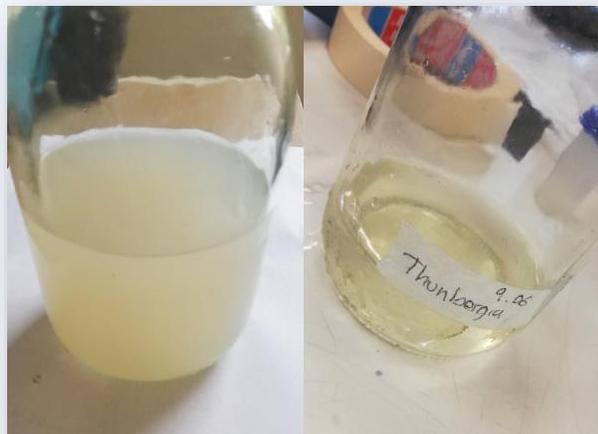


Foto 12. Agua gris clara al inicio (izquierda) y al final de experimento (derecha)

A medida que el agua se descontamina por el filtro y por las plantas, los sólidos suspendidos presentes en el agua y la turbiedad también tienden a reducirse generando **agua más clara** (Figura 12). Los mesófilos no pueden ser eliminados por plantas, así

que para garantizar que el agua puede ser reusada en actividades que requieran baja cantidad de microorganismos es necesario desinfectar ya sea por **cloración**⁴⁴, **lámparas UV**⁴⁵, filtros muy finos, etc.

Área foliar de las plantas usadas para el tratamiento de aguas grises claras

El área foliar se puede evaluar con mediciones en el **ancho máximo** y el **largo máximo** de las hojas, y el seguimiento al cambio de área foliar se da al medir semanalmente qué tanto aumenta o disminuye el área foliar. **¿Qué nos dice el área foliar?** Valores positivos en un porcentaje de aumento indicarán crecimiento del área foliar mientras que valores negativos sugieren que las plantas pierden área foliar ya sea por quema de las puntas, pérdida de algún fragmento de la hoja o caída de estas.

En la evaluación experimental se comparó el área foliar de plantas regadas con agua potable y plantas regadas con agua gris clara y se observó que en *Cissus rhombifolia*, *Hedera hélix* y *Thunbergia grandiflora* el riego con agua gris clara no disminuye ni aumenta el área foliar comparada con las plantas regadas con agua potable, pero *Epipremnum aereum* cuando se riega con agua gris clara **umenta hasta dos veces** más su área foliar comparada con las plantas que se riegan con agua potable.

Evaluación espectrofotométrica

Una vez se toman las firmas espectrales con el espectrofotómetro, pueden ser visualizadas con el programa ViewSpecPro. **¿Y cómo se pueden interpretar estos datos?** Para esta evaluación experimental se evaluaron de dos formas: interpretación de las graficas de las firmas

espectrales y análisis de índices de vegetación con los valores de reflectancia. Los valores en la reflectancia dependen de aspectos como la luz, los nutrientes, edad de la hoja o el estrés (Evangelides & Nabajas 2020), de allí que estos datos ayuden a identificar problemas en las plantas.

¿Cómo se interpretan las gráficas?

El espectrofotómetro utilizado tiene la capacidad para medir reflectancias entre los 325 nanómetros⁴⁶ (nm) hasta los 1075 nanómetros. En ese rango cada especie tiene una curva característica y las diferencias en las curvas pueden **indicar aspectos relacionados a la salud de las plantas**. En la figura 13 se observan dos regiones, en la región 1 entre los 500 nm – 650 nm se puede observar si una planta tiene una deficiencia nutricional relacionada al **Potasio o Calcio** (Battie-Laclau *et al.* 2013), y en la región 2 entre 700 nm – 740 nm se pueden observar **deficiencias de nitrógeno** o estrés en general en la planta (Noh *et al.* 2006).

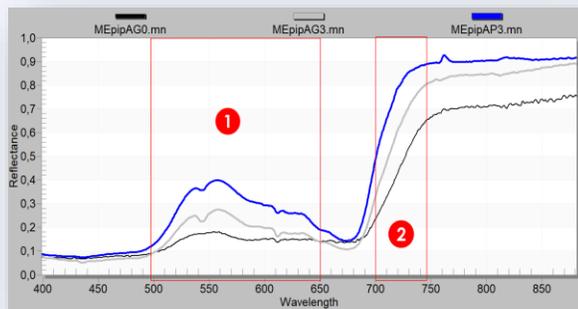


Figura 13. Curvas espectrales para la *Epipremnum* tratada con agua potable (línea azul) y *Epipremnum* tratada con agua gris clara (línea gris) y *Epipremnum* al principio del experimento (línea negra). Reflectancia en función de longitud de onda

Cuando la concentración de clorofila⁴⁷ disminuye por alguna **deficiencia** nutricional ya sea de Nitrógeno, Potasio o Calcio las **reflectancias aumentan**. Esto quiere decir, que entre más bajos sean las

reflectancias en la curva más saludable estará la planta.

En *Epipremnum aureum* se presentaron **mayores deficiencias nutricionales en las plantas regadas con agua potable**, ya que esta no contenía nutrientes y las plantas regadas con agua gris clara también presentaron una deficiencia respecto al estado inicial de las plantas. Aunque esta agua si tenía algunos nutrientes, algunos elementos como Potasio y Calcio pueden faltarle a la planta para tener estados óptimos.

Al evaluar las gráficas para todas las especies, se encontró que *Hedera* y *Thunbergia* tienen mejor comportamiento en la curva espectral cuando las plantas se riegan con agua gris clara y *Cissus* presenta **mayores deficiencias** nutricionales cuando es regada con agua gris clara.

¿Cómo se hallan los índices de vegetación?

Inicialmente se deben seleccionar las bandas de longitud de onda⁴⁸ de interés. Estas se seleccionan de acuerdo con los factores que quieren monitorearse en las plantas. Por ejemplo, si se quiere evaluar el contenido de humedad de una planta Colombo *et al.* 2008 sugiere evaluar las reflectancias de la banda 860 nm y 1487 nm.

Una vez se seleccionan las bandas se pueden calcular los Índices de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). El **NDVI 705** (compara una banda del infrarrojo con la banda 705 nm) nos ayuda a identificar cambios a nivel nutricional o estrés en la planta y el **NDVI 660** es usualmente utilizado para correlacionar la concentración de nitrógeno en las hojas de las plantas (Costa *et al.* 2001). La tasa **NDVI 560/NDVI 645** indica el estado de salud general de la planta, cuando el resultado es superior a 0.8 se dice que la planta se encuentra en condiciones óptimas y valores inferiores indican mal estado de salud.

Estos Índices son valiosos como indicadores sobre el estado actual de una planta, pero también permiten elaborar modelos que ayuden a predecir el estado de salud o nutrición de las plantas con el paso del tiempo bajo el sistema de riego que se tiene.

¿Cómo pueden ser interpretados los valores de NDVI?

Cuando se tienen datos puntuales se interpreta como se mencionó anteriormente, pero si se quieren establecer modelos predictivos lo mejor será graficar los valores para el NDVI en función del tiempo. Cuando se grafica el NDVI 560 vs el NDVI en función del tiempo se puede establecer el grado de estrés de una planta asociado al nitrógeno y el agua, cuanto más baja sea la pendiente⁴⁹ menor estrés tiene la planta (Ritchie 2003).

Usualmente la tendencia, o la pendiente de las graficar nos ayudarán a identificar si una planta está mejorando o empeorando con el paso del tiempo. Es recomendable el uso de varios Índices para tener una visión más global sobre el estado de una planta.

En la evaluación experimental, por ejemplo, *Epipremnum* presentó los comportamientos que se muestran en la Figura 14. El NDVI 660 indica que en los primeros 20 días del experimento se dio un estrés por nitrógeno en las plantas regadas con agua potable y las regadas con agua gris clara, aunque presentaron peor comportamiento las plantas regadas con agua potable. Al final del experimento las plantas regadas tanto con agua potable como con agua gris clara empezaron a presentar mejoras en cuanto a este indicador de nitrógeno, pero en el comportamiento del NDVI 705 y la tasa NDVI 560/NDVI 645 se observa que el estado de salud y los aspectos nutricionales de las plantas tiene a empeorar con el tiempo (pendientes negativas). Adicionalmente tanto *Epipremnum* regada con agua gris clara, como *Epipremnum* regada con agua potable tienen altas pendientes en el gráfico NDVI 560 vs. NDVI 645,

indicando que ambas formas de riego generan estrés por nitrógeno o agua.

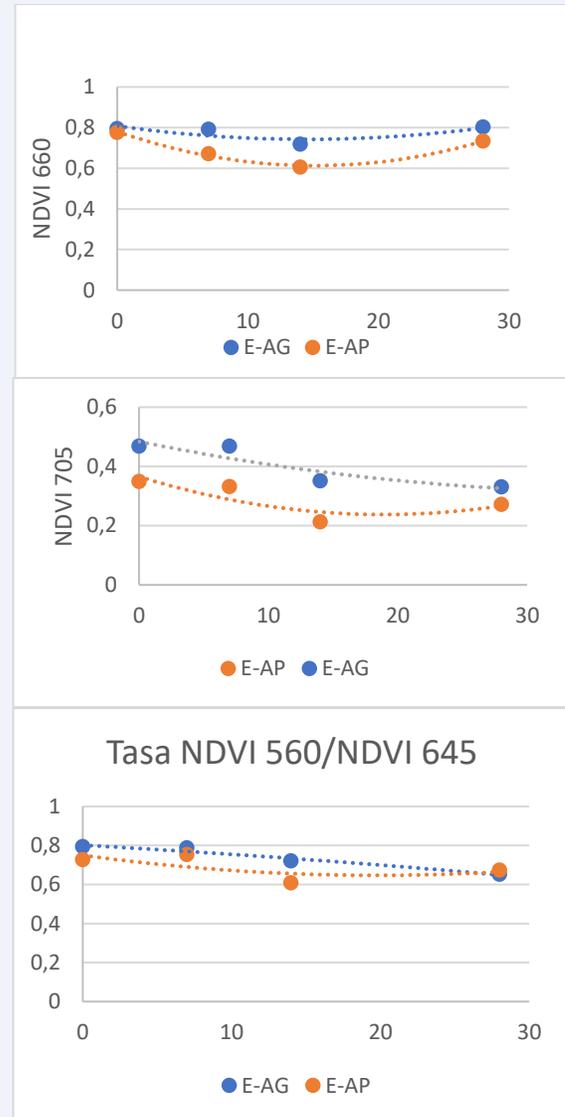


Figura 14. Comportamiento de *Epipremnum* regada con agua gris clara (azul) y *Epipremnum* regada con agua potable (naranja) durante 28 días

Con el ejemplo anterior se muestra la importancia de tomar varios NDVI para evaluar el estado general de una planta, el uso de un solo índice podría no darnos suficiente información sobre el estado o la afectación de una planta cuando es regada o no con agua gris clara.

¿Por qué es importante el NDVI para evaluar el estado de salud de las plantas que tratan aguas grises claras en paredes verdes?

La espectrofotometría, y el cálculo de los NDVIs es importante porque permite generar modelos que predicen el estado de las plantas a futuro. Esto quiere decir que, aunque una planta muestre un indicador NDVI (como la Tasa NDVI 560/NDVI 645) no favorable, **la planta puede no estar mostrando síntomas visibles de deterioro.**

En el caso de *Epipremnum* en la evaluación experimental como se mostró anteriormente, se encontraron índices que muestran mal estado de salud, mientras que en la Figura 15 se observa que no hay síntomas visibles todavía.

El NDVI es una herramienta que permite generar alertas sobre estados de nutrición y salud general. La **integración** de este tipo de herramientas al tratamiento de aguas grises claras en paredes verdes permite tomar decisiones para aumentar el tiempo de vida de las plantas y especies utilizadas.



Figura 15. Estado final de *Epipremnum* siendo regada por agua potable (izquierda) y siendo regada con agua gris clara (derecha)

Conclusiones

El uso de plantas enredaderas en una pared verde puede **favorecer la remoción de nutrientes y contaminantes de las aguas grises claras.**

Especies como *Cissus*, *Thunbergia*, y *Epipremnum*, las cuales son **muy comunes** en la ciudad pueden remover altas concentraciones de fósforo aumentando en más de **20%** la eficiencia de eliminación de este nutriente en medios inertes como la arena.

Las plantas solas no tienen un comportamiento estable en relación con el nitrógeno amoniacal.

La evaluación del área foliar, evaluación de color o turgencia, integrado con análisis espectrales como los NDVI **posibilita estrategias en el cuidado de las plantas en una pared verde con tratamiento de aguas grises** al permitir visualizar el estado nutricional de las plantas antes de que presenten síntomas negativos al usarse métodos **no destructivos y con alto valor predictivo.**

Se destaca el comportamiento de *Cissus* que alcanzó remociones de 79.69%, 57.25%, 11.76% para DQO, fósforo Total y SST, en nitrógeno amoniacal presentó aumentos. Así mismo fue la especie con mayor valor en la tasa NDVIv/NDVIr indicando un buen estado de salud, *Epipremnum* tuvo un buen desempeño en remoción de nutrientes y DQO, pero tiene proyección a tener fallas nutricionales. Los índices obtenidos permiten predecir el estado de las plantas respecto al contenido nutricional o el estrés cuando se hacen de manera conjunta.

Recomendaciones

El uso de material de **soporte** con buen contenido de Carbono y garantizar un tiempo de retención alto para **favorecer los procesos de nitrificación y desnitrificación** de las aguas grises claras, así como

el uso de especies combinadas en las paredes verdes con tratamiento de aguas grises claras, de esta manera se potencia la remoción de nutrientes especialmente del nitrógeno. La buena conjugación de especies puede presentar oportunidades para alcanzar altos rendimientos.

En una pared verde es necesario agregar micro⁵⁰ y macronutrientes⁵¹ esenciales para el desarrollo de la planta que no se encuentren en el medio de soporte, aunque el agua gris clara contiene muchos nutrientes algunos no estarán presentes y podrán generar deficiencias a largo plazo que pueden comprometer el tiempo de vida útil del sistema y generar costos adicionales asociados a mantenimiento o cambio de la vegetación.

El monitoreo de las paredes verdes con espectrofotometría es una herramienta importante que ayuda a la prevención de enfermedades en las plantas causadas por deficiencias o excesos de nutrientes. La evaluación de índices de

vegetación favorece la predicción del tiempo de vida de una planta en una pared verde con aguas grises claras sin nutrientes adicionales agregados.

Se recomienda la implementación de paredes verdes modulares para el tratamiento de aguas grises claras ya que estas pueden ser controladas de manera más eficiente y permiten un buen direccionamiento de las aguas sin generar problemas de humedad.

Bibliografía

- Battie-Laclau, P. Laclau, J- De Cassia, M. Arenque, B. Beri, C. Mietton, L. Muniz, A. Jordan-Meille, L. Silveira, M. Nouvellon, Y. Ranger, J. Bouillet, J. (2013). Influence os Potassium and Sodium on leaf área components in *Eucalyptus grandis* tres. *Plan and Soil*, 371(1-2): pp. 19-35. DOI: 10.1007/s11104-013-1663-7
- Brizuela-Amador, B. Alcántar-González, G. Sánches-García, P. Pea-Kalra, Y. Crumbaugh, J. Olive, C. Tijerina-Chávez, L. Maldonado-Torres, R. (2007). Establecimiento de índices espectrales en el diagnóstico nutrimental de nitrógeno en maíz. *Agrociencia* 41(8): pp 827-835. ISSN: 1405-3195. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30220203002>
- Collison, R. Grismer, M. (2013). Nitrogen and COD removal from Domestic and Synthetic Wastewater in subsurface flow constructed Wetland. *Water Environ. Res.* 85(9): pp. 855-862. DOI: 10.2175/106143013X13736496909022
- Costa, C. Dwyer, L. Dutilleul, P. Stewart, D. Luo Ma, B. Smith, D. (2001). Inter-relationships of applied nitrogen, SPAD, and Yield of leafy and non-leafy maize genotypes. *Journal of Plant nutrition*, 24(8), pp 1173-1194. DOI: 10.1081/PLN-100106974
- Diaper, C. Toifl, M. Storey, V. (2008). Greywater Testing Protocol. CSIRO: Water for a Healthy Country National Research Flagship. DOI: 10.4225/08/59aef594a011d
- Huang, J. Chen, Q. Xu, L. (2013). Problems and countermeasures in the application of constructed wetlands. *Huan Jing Ke Xue*, 34(1): pp. 401-408. PMID: 23487968
- Ingle, K. Padole, D. (2017). Phosphate solubilizing Microbes: and overview. *International Journey of current microbiology and Applied Sciences* 6(1): pp. 844-852. DOI 10.20546/ijcmas.2017.601.099
- Larsen, T., Udert, K., Lienert, J. 2013. Source separation and decentralization for wastewater management. *IWA Publishing*, London. ISBN 9781843393481
- Liang, J. Liu, J. Jia, P. Yang, T. Zeng, Q. Zhang, S. Liao, B. Shu, W. Li, J. (2021) Novel phosphate-solubilizing bacteria enhance soil phosphorus cycling following ecological restoration of land degraded by mining. *ISME J* 14, pp 1600-1613. DOI:10.1038/s41396-020-0632-4
- Ni, B. Pan, Y. Guo, J. Viridis, B. Hu, S. Chen, X. Yuan, Z. (2016). Denitrification processes for wastewater treatment In: *Metalloenzymes in Denitrification: Applications and environmental impacts*. Capítulo 16. The Royal Society of Chemistry. DOI: 10.1039/9781782623762-00368
- Niño-Rodríguez, E., Martínez, N. (2013). Estudio de Aguas grises domésticas en tres niveles socioeconómicos de la ciudad de Bogotá (Tesis de pregrado, Ingeniería civil). Pontificia Universidad Javeriana. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/11139>
- Noh, H. Zhang, Q. Shin, B. Han, S. Feng. L. (2006). A Neutral Network of maize crop nitrogen stress assessment for a multi-spectral imaging sensor. *Biosystems Engineering*, 94(4), pp 477-485. DOI: pp 10.1016/j.biosystemseng.2006.04.009
- Ramalho, R. (1996). *Tratamiento de aguas residuales*. Barcelona: Editorial Reverté

- Remacle, J. (1972). Mixed culture of micro-organisms in the rhizosphere of ivy (*Hedera helix.*). *Plant and Soil*, 36(1), pp. 199-203. DOI: 10.1007/BF01373470
- Richardson, A., Simpson, R. (2011). Soil microorganisms mediating phosphorus Availability. *Plan physiology* 156: 989-996. DOI 10.1104/pp.111.175448
- Ritchie, G. (2003). Use of ground-based canopy reflectance to determine radiation capture, Nitrogen and Water Status, and final Yield in wheat. *All Graduate Theses and Dissertations*. 5632. Disponible en: <https://digitalcommons.usu.edu/etd/5632>
- Romillac, N. (2019). Ammonification. *Encyclopedia of Ecology*, 2: pp. 256-263. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10889-9
- Rysulova, M. Kaposztasova, D. Vranayova, Z. (2017). Green wall as an approach in grey water treatment. *IOP Conf. Ser.: Materials Science and EGINEERING*, 245: 072049. DOI: 10.1088/1757-899X/245/7/072049
- Verma, D. Dougall, D. (1979). Biosynthesis of myo-Inositol and its Role as a Precursor of cell-wall Polysaccharids in Suspension cultures of Wild-carrot cells. *Planta* 146, pp 55-62. DOI: 10.1007/BF00381255
- Wei, W. Tong, J. Hu, B. (2019). Study of ecological dynamic model for phytoremediation of farmland drainage water. *Journal of hidrology*, 578(124026). DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124026

Glosario

- 1 **Aguas residuales:** Son cualquier tipo de agua cuya calidad se vio afectada negativamente por influencia antropogénica.
- 2 **Parámetro:** dato o factor que se toma como necesario para analizar o valorar una situación.
- 3 **Sólidos Suspendidos Totales:** Es una medida del peso total de los residuos sólidos contenidos en el agua, también puede definirse como el peso de los sólidos suspendidos en un volumen específico.
- 4 **Turbiedad:** medida del grado de transparencia que pierde que el agua o algún otro líquido incoloro por la presencia de partículas en suspensión.
- 5 **pH:** Es una medida de la acidez o alcalinidad, en este caso del agua. La medición se da en una escala de 0 a 14, siendo 7.0 pH neutro, pH < 7.0 ácido y pH > 7.0 base o alcalino.
- 6 **Nitrógeno:** Es un elemento químico abundante en la naturaleza, cuando se encuentra como nitrato o amonio es un nutriente necesario para el crecimiento de las plantas. Se pueden producir excesos por drenaje o uso de fertilizantes. El exceso en aguas causa perdida de oxígeno disuelto
- 7 **Fósforo:** Es un elemento químico que se encuentra en la naturaleza combinado en fosfatos inorgánicos y en organismos vivos.
- 8 **Mesófilos:** Hace referencia a los microorganismos (especialmente bacterias) capaces de crecer entre los 20-37 °C. Es un indicador microbiológico de la contaminación del agua.
- 9 **Materia orgánica:** Se refiere a moléculas que contienen carbón e hidrógeno. La materia orgánica puede ser responsable del color, olor, y sabor del agua.
- 10 **Oxidación aerobia:** Utilización de materia orgánica por parte de microorganismos en presencia de oxígeno, con esto se produce biomasa, así como dióxido de carbono, agua, nitratos, etc.
- 11 **Biodegradable:** Es una característica de determinados compuestos para poder ser utilizados por microorganismos como fuente de alimentación.
- 12 **Amonio:** compuesto inorgánico de nitrógeno formado durante la degradación biológica de compuestos orgánicos de nitrógeno.
- 13 **Humedal:** área que permanece en condiciones de inundación o con suelo saturado con agua.
- 14 **Nitrificación:** Es una etapa importante del ciclo del nitrógeno. Es la oxidación del amonio para producir nitrito, seguida por la oxidación del nitrito a nitrato.
- 15 **Bacterias desnitrificantes:** Bacterias que consiguen su energía por la oxidación de compuestos inorgánicos del nitrógeno.
- 16 **Nitrógeno amoniacal:** Es un compuesto que puede estar presente en forma NH_4^+ o NH_3 en el agua según el pH. Se encuentra presente en el agua de forma natural como producto de la degradación de compuestos orgánicos e inorgánicos.
- 17 **Ciclo biogeoquímico:** Consiste en la conexión entre elementos vivos y no vivos. Es el movimiento cíclico de Nitrógeno, Oxígeno, Hidrógeno, Fósforo, Carbono y otros elementos entre los seres vivos y el medio ambiente mediante una serie de procesos.
- 18 **Humedales construidos:** sistema ingenieril diseñado y construido para el tratamiento de las aguas gracias a la interacción de las plantas, el medio de enraizamiento, los microorganismos y la atmosfera.
- 19 **Biofiltro:** filtro provisto de microorganismos aerobios que eliminan contaminantes del agua, puede ser artificial o natural. El suelo es un filtro natural (o biofiltro).
- 20 **Paredes verdes modulares:** forma de jardinería urbana vertical en la que las plantas están separadas en módulos (bandejas, materas, bolsas).
- 21 **Espectrofotometría:** Técnica analítica con la que es posible evaluar la radiación electromagnética absorbida, transmitida o reflejada por un material en función de la longitud de onda.
- 22 **NDVI:** Índice de vegetación de Diferencia normalizada, es un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que vegetación emite o refleja
- 23 **Reflectancia:** Fracción de radiación incidente reflejada por una superficie.

-
- 24 NaHCO_3 : Bicarbonato de sodio, compuesto alcalino soluble en agua.
- 25 **Contaminantes orgánicos**: contaminantes basados en carbón, pueden ser herbicidas, pesticidas, materia vegetal o animal descompuesta, entre otros.
- 26 **Aclimatamiento**: proceso por el cual el organismo se adapta fisiológicamente a cambios en el medio ambiente.
- 27 **Calidad del agua**: características físicas, químicas, biológicas y radiológicas del agua.
- 28 **Espectrofotómetro**: Dispositivo que mide la intensidad de la energía electromagnética en cada longitud de onda de la luz en una región específica.
- 29 **Firma espectral**: Es la variación de la reflectancia en función de la longitud de onda.
- 30 **Demanda Química de Oxígeno**
- 31 **Filtración**: Proceso de separación de sólidos en una suspensión a través de un medio mecánico poroso.
- 32 **Oxigenación**: aumento del oxígeno disuelto en el agua, con el fin de favorecer crecimiento de microorganismos aerobios.
- 33 **Cinética de la reacción**: estudio de la rapidez de la reacción o el cambio de la rapidez de una reacción bajo condiciones variables
- 34 **Modelo cinético**: representación abstracta, conceptual, gráfica o visual para describir la velocidad de reacción.
- 35 **Adsorber**: Atraer, retener o adherir moléculas o átomos de una sustancia a una superficie de un material.
- 36 **Solubilización del fósforo**: mecanismo para hacer disponible al fósforo de fuentes inorgánicas
- 37 **Enzimas**: moléculas orgánicas que actúan como catalizadores de reacciones
- 38 **Mineralización bioquímica del fósforo**: mecanismos para hacer disponible al fósforo de fuentes orgánicas, se da por enzimas fitasas y fosfatasas.
- 39 **Hidrolizar**: romper uno o más enlaces químicos con agua.
- 40 **Amonificación**: conversión de compuesto nitrogenados orgánicos en amoniaco.
- 41 **Nitrógeno atmosférico**: se encuentra en la forma N_2
- 42 **Carbono**: Elemento químico de mayor abundancia a nivel de la corteza terrestre.
- 43 **Inerte**: carencia de vida.
- 44 **Cloración**: desinfección del agua mediante el empleo de cloro o compuestos clorados.
- 45 **Lámparas UV**: O lámparas de esterilización UV. Usa radiación UV-C que es luz ultravioleta de onda corta lo que permite desinfectar al matar o inactivar microorganismos por destrucción de material genético.
- 46 **Nanómetro**: Unidad equivalente a una mil millonésima parte de un metro ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$).
- 47 **Clorofila**: Pigmento verde que se encuentra en las plantas. Absorbe la luz solar y la convierte en energía para la planta.
- 48 **Longitud de onda**: describe que tan larga es una onda, depende del medio en que la perturbación se propaga.
- 49 **Pendiente**: Inclinación respecto a un plano.
- 50 **Micronutrientes**: En nutrición vegetal serían los elementos Cloro, Hierro, Boro, Zinc, Manganeso, Molibdeno, Cobre.
- 51 **Macronutrientes**: Pueden ser primarios o secundarios, los primeros son nitrógeno, fósforo, Potasio. Y los secundarios son Azufre, Calcio, Magnesio.