

**ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO DE LA CALIDAD DEL SUELO EN EL SECTOR
DE LA PTAR SALITRE, BARRIO SANTA CECILIA-SUBA.**

**ANGIE CENEIDY ALVAREZ RIOS
DEISY ESTEFANIA ORTIZ VALBUENA**



**UNIVERSIDAD COLEGIO MAYOR DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD
BACTERIOLOGÍA Y LABORATORIO CLÍNICO
BOGOTA D.C. ABRIL 2022**

**ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO DE LA CALIDAD DEL SUELO EN EL SECTOR
DE LA PTAR SALITRE, BARRIO SANTA CECILIA-SUBA.**

**ANGIE CENEIDY ALVAREZ RIOS
DEISY ESTEFANIA ORTIZ VALBUENA**

**MONICA ALEJANDRA RODRIGUEZ ARISTIZABAL M.SC
ASESORA INTERNA**

**Para optar por el título de:
BACTERIÓLOGA Y LABORATORISTA CLINICO**

**UNIVERSIDAD COLEGIO MAYOR DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD
BACTERIOLOGÍA Y LABORATORIO CLÍNICO
BOGOTA D.C. ABRIL 2022**

DEDICATORIA

La presente investigación la dedicamos principalmente a Dios, quien nos puso en este camino y siempre ha estado ayudándonos. A nuestras familias, porque hemos logrado lo que con trabajo, sacrificio y amor nos dieron, una oportunidad, privilegio y compromiso que muchos jóvenes no tienen para educarse y formarse profesionalmente. A la Universidad y todas las personas que nos brindaron su conocimiento y apoyo haciendo que el presente trabajo culmine exitosamente y se aporte a nuestra sociedad.

Dedicado a todo aquel desorientado, que se sienta abrumado y perdido en su camino, pero que con fe aun sigue luchando, que está sintiendo el estrés, sacrificio y el sobre esfuerzo que se necesita para finalizar esta etapa, esperamos que la información obtenida y recopilada aquí, sea de utilidad y guía para su trabajo. Adelante que si se puede.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por bendecir, fortalecer y guiar nuestras vidas.

Gracias a nuestras familias:

Mi Padre Pablo Arturo por ser el Pilar de mis sueños, apoyarme, confiar y creer. Por el esfuerzo y sacrificio de darme la oportunidad que sus padres no pudieron y enseñarme que con educación y formación tendría la libertad de lograr todo en la vida. Este logro es tuyo también padre amado. A mi madre Lucy y mi hermano Jhojan por los consejos, el tiempo, la paciencia y el apoyo. A mis abuelitos y mi tía Sonia por sus consejos, fuerza, ánimo, apoyo, respaldo, cariño y fe en que lo lograría. A mi amado Brayan Romero por soñar conmigo, ser incondicional, creer siempre en mí y ayudarme en las etapas más difíciles de este camino.

A mi madre Alba y a mi padre Martin que está en el cielo, a mis hermanos y mi sobrino Harry, que con su paciencia y dedicación, me brindaron su apoyo incondicional. También, a mi pareja Sebastián Moreno, amigos y amigas, quienes aportaron bastante para la realización del mismo y siempre estuvieron dando fuerzas y perseverancia para culminar este proceso.

Agradecemos a la docente Mónica Rodríguez asesora de esta investigación por su compañía, paciencia, compromiso y dirección durante todo este proyecto. Agradecimiento de manera especial a la Bacterióloga Valeria Osorio por compartir de manera desinteresada su conocimiento, tiempo, valores y espacios para alcanzar este objetivo. Y finalmente, a la Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca y a todos los docentes, amigos, compañeros y futuros colegas que con su ayuda y presencia hicieron más valioso este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| RESUMEN | 9 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 9 |
| 2. JUSTIFICACIÓN | 12 |
| 3. OBJETIVOS | 14 |
| 3.1 Objetivo General | 14 |
| 3.2 Objetivos Específicos | 14 |
| 4. ANTECEDENTES | 14 |
| 4.1 Microorganismos como indicadores de la calidad del suelo | 17 |
| 5. MARCO CONCEPTUAL | 18 |
| 6. MARCO DE REFERENCIA | 20 |
| 7. MARCO LEGAL | 23 |
| 8. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO | 25 |
| 9. METODOLOGÍA | 27 |
| 9.1 Identificación de la zona y obtención de las muestras | 27 |
| 9.2 Análisis Físicoquímico | 27 |
| 9.3 Análisis Microbiológico | 29 |
| 10. RESULTADOS | 32 |
| 10.1 Identificación de la zona y obtención de las muestras | 32 |
| 10.2 Análisis Físicoquímico | 33 |
| 10.3 Análisis Microbiológico | 34 |
| 10.4 Pruebas Bioquímicas | 38 |
| 11. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 38 |
| 12. CONCLUSIONES | 45 |
| 13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 47 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----------|
| Figura 1. Zona PTAR Salitre | 25 |
| Figura 2. Áreas seleccionadas para el estudio | 26 |
| Figura 3. zona de muestreo aleatorio simple en zig zag (Fragmento 1) | 27 |
| Figura 4. zona de muestreo aleatorio simple en zig zag (Fragmento 2) | 27 |
| Figura 5. Tabla de color de Munsell | 28 |
| Figura 6. Diagrama de flujo para el análisis microbiológico | 30 |
| Figura 7. Desarrollo de la metodología en el laboratorio | 31 |
| Figura 8. Montaje de BBL CRYSTAL en el laboratorio | 31 |
| Figura 9. Actividades antrópicas observadas alrededor de la zona | 32 |
| Figura 10. Muestras representativas de la zona (Fragmento 1 y 2) | 33 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|-----------|
| Tabla 1. Texturas del suelo | 28 |
| Tabla 2. Resultados del análisis del color del suelo | 33 |
| Tabla 3. Resultados del análisis fisicoquímico | 33 |
| Tabla 4. Caracterización Morfológica de Microorganismos Aislados. | 36 |
| Tabla 5. Función de los microorganismos aislados | 38 |

ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO DE LA CALIDAD DEL SUELO EN EL SECTOR DE LA PTAR SALITRE, BARRIO SANTA CECILIA-SUBA.

RESUMEN

Los humedales son esenciales para la vida en el planeta Tierra, en donde se presenta claramente las interacciones del ecosistema a través del aire, agua, flora y fauna, los cuales se encuentran directamente en contacto con el suelo, la superficie de la corteza terrestre. Allí, ocurren varios procesos biogeoquímicos gracias a la actividad de los microorganismos presentes, los cuales sustentan y mantienen un equilibrio de la vida misma, de esta manera, estos individuos microscópicos se tornan sensibles y pueden alterarse fácilmente frente a los impactos negativos y efectos ocasionados por el cambio de uso del suelo, como la construcción de empresas generadoras de contaminantes en el lugar, el desarrollo de actividades antrópicas a la falta de concientización ambiental, entre otros. Este proyecto, busca poner en evidencia estos impactos, específicamente en la zona de la PTAR Salitre, anteriormente el humedal el Cortijo, mediante el análisis fisicoquímico del suelo aledaño, así como, resaltar la importancia de la actividad microbiana presente en el suelo de esta zona de la ciudad.

Palabras clave: impacto del suelo, PTARs, indicadores de calidad, contaminantes, fosfato solubilizadores y fijadores de nitrógeno, coliformes totales y *E coli*.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación en el suelo ocasionada por el funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), es una problemática que viene en aumento; aunque estas plantas garantizan el saneamiento de las aguas contaminadas, aún se desconoce el efecto real de estas prácticas sobre las propiedades del suelo y las comunidades microbianas en la zona donde están ubicadas, debido a que las aguas residuales necesitan tratamientos que implican procesos físicos, químicos y biológicos, que incrementan la formación de productos contaminantes resultantes de estos procesos; en consecuencia se producen cambios en la población de microorganismos autóctonos presentes en el suelo¹, un ejemplo de ello es el fenómeno de la eutrofización, que acelera la actividad microbiana e induce el aumento de la

densidad de población en el medio acuático y terrestre³; por otra parte la generación de biosólidos con algunos componentes tóxicos como metales pesados, que provocan directamente la contaminación del agua y del subsuelo⁴, y la persistencia de antibióticos y ARG (Genes de Resistencia a Antibióticos) en el medio ambiente⁵ ocasionando la pérdida parcial o total de la productividad del suelo por erosión, degradación química, y producción de sulfuro de hidrógeno y metano que es el segundo gas de efecto invernadero que más contribuye al calentamiento global⁹.

Frente a esta situación, el Informe Mundial sobre Recursos del Suelo identificó que la contaminación producida en cuerpos de agua en relación con el suelo representa una de las principales amenazas para los ecosistemas³, sin embargo existen pocas referencias a nivel investigativo, que hagan énfasis en la afectación en la calidad y composición de los diferentes tipos de suelos, así como su incidencia en el cambio climático¹, en relación con el incremento de la población y la necesidad de nuevas industrias en el planeta. Esto no sólo afecta de manera significativa y directa a los ríos, mares y océanos sino que de igual manera tiene una afectación directa que contribuye a cambios funcionales y estructurales del suelo.

Los peligros químicos en las PTAR surgen de la descomposición de la materia orgánica, lo cual incide en la contaminación del suelo ocasionando una problemática que se viene incrementando y que afecta de forma directa la disponibilidad de recursos en muchas regiones del país. La sobresaturación de carga orgánica desequilibra los ecosistemas originando sobre-abundancia de nutrientes especialmente de nitrógeno y fósforo en el medio generados por el vertimiento de aguas residuales y los gases de efecto invernadero como el metano y otros compuestos como el sulfuro de hidrógeno que se encuentra generalmente en las plantas de tratamiento de desechos, estos interfieren bioquímicamente con el mecanismo de transporte de electrones y bloquea la utilización de oxígeno a nivel molecular⁹ provocando una repercusión en la población de microorganismos autóctonos presentes en el suelo³. Adicional a esto las PTAR tienen una capacidad limitada para eliminar compuestos antibióticos¹⁰, por lo que terminan en el medio ambiente acumulando ARG a largo plazo, aumentando las poblaciones de microorganismos resistentes a antibióticos.

Se ha encontrado que las PTAR generan impactos ambientales que afectan gravemente los recursos naturales que se encuentren a su alrededor, en el caso de la PTAR Salitre, los estudios realizados para identificar estas alteraciones son muy reducidos y más cuando se

requiere información del análisis del recurso del suelo. Las PTAR pueden ocasionar estos efectos nocivos debido al consumo excesivo de energía y productos químicos, los cuales son empleados para el tratamiento de los residuos. De igual manera, al terminar los diferentes procesos, se obtienen lodos activados residuales y algunas sustancias que contribuyen a la emisión de gases de efecto invernadero, gran problemática a nivel mundial.

Los subproductos resultantes deben someterse a un tratamiento riguroso para poder ser reutilizados, como el caso de los lodos activados residuales, los cuales son procesados con diferentes metodologías obteniendo finalmente los biosólidos, en donde la PTAR Salitre cuenta con un plan de gestión para los mismos.

A pesar de que la PTAR Salitre cumple con estos protocolos y pretende mejorar diferentes aspectos en sus procesos, es clave mencionar que la infraestructura de la planta se encuentra ubicada en una zona donde anteriormente se situaba el Humedal el Cortijo, un ecosistema muy amplio, de acuerdo con esto se puede inferir que el lugar ha tenido diversas modificaciones en cuanto a su estructura principal natural y por ende, alteraciones tanto en la fauna como flora del espacio. Este impacto en el suelo ocasiona modificaciones en sus características y condiciones actuales, además, se suma el contacto del suelo con el afluente del Río Bogotá, el cual se encuentra en proceso de saneamiento por parte de la PTAR Salitre, es así como el suelo puede contener sustancias nocivas (químicos, metales pesados, aumento de la materia orgánica, entre otros) perjudiciales para su funcionalidad.

En consecuencia, sumado a la falta de compromiso y carencia de protocolos rigurosos para las PTAR, y tal como ocurre en la planta del Salitre que no cuenta con los estándares más altos en sus procesos¹¹, se evidencian los efectos ambientales adversos en el suelo, agua y atmósfera. Es importante mencionar que, algunas características observables como la permeabilidad, conductividad, la cobertura vegetal, se relacionan de forma directa con la calidad del suelo, que se ve afectado en zonas cercanas a las PTAR por los residuos sólidos y líquidos extraídos y que en muchas ocasiones no tienen el manejo adecuado para su eliminación o aprovechamiento². Así mismo la ubicación de algunas comunidades sobre los cursos de los afluentes del río Bogotá (Juan Amarillo, Salitre, San Cristóbal, Fucha, Tunjuelo) traen como consecuencia vertimientos de desechos domésticos e industriales¹² siendo evidente la problemática de contaminación y disminución de corrientes superficiales afluentes de ecosistemas estratégicos cercanos a esta zona, como el humedal Tibabuyes.

De acuerdo con el contexto expuesto, se propone la siguiente pregunta orientadora para esta investigación: *¿Cómo incide el funcionamiento de la PTAR Salitre en la calidad microbiológica del suelo en el barrio Santa Cecilia-Suba?*

2. JUSTIFICACIÓN

Los suelos son ecosistemas altamente biodiversos, con una gran importancia ecológica a nivel microbiológico, los microorganismos en el suelo permiten procesos vitales como los ciclos biogeoquímicos, la estructuración, la supervivencia y funcionamiento de las plantas, en consecuencia se relacionan con el equilibrio biológico del planeta. Colombia es un país con amplias zonas naturales, en donde se puede encontrar gran variedad de especies a nivel macro y microscópico convirtiéndose en un territorio que necesita la implementación y acción de planes enfocados a la preservación, cuidado y conservación de todas sus áreas naturales, que a lo largo de la historia se han ido transformando y reduciendo; lo que causa la disminución de la población animal, vegetal y microbiológica, incrementándose el desequilibrio en el funcionamiento de la vida.

Una de las zonas más afectadas por la contaminación en el país, particularmente en la zona andina central, es el Río de Bogotá, que actualmente se encuentra debilitado por la descarga de residuos sólidos y líquidos a lo largo de su recorrido. Su deterioro continuo requiere de acciones concretas que tengan incidencia en los tomadores de decisiones, autoridades ambientales y sobre todo en las comunidades directa e indirectamente relacionadas con su recorrido, desde su nacimiento en el páramo de Guacheneque hasta su desembocadura en el Río Magdalena a la altura del municipio de Girardot. El desconocimiento y la falta de apropiación ambiental han contribuido con la contaminación de diferentes compuestos orgánicos e inorgánicos y la descarga de residuos sólidos y escombros en varias zonas de influencia de este afluente.

Por esta razón, es de vital importancia la implementación de estudios que determinen y expongan esta problemática ambiental, como este proyecto de investigación, que busca hacer un análisis del suelo ubicado alrededor de la PTAR Salitre, antigua zona del humedal el cortijo, donde se une el humedal Tibabuyes con el caudal del Río Bogotá, mediante el uso de

herramientas y pruebas de laboratorio que pongan en evidencia el alto impacto de estos contaminantes específicamente en el suelo rizosférico. Asimismo, la aplicación del análisis microbiológico en este estudio cumple un papel fundamental, ya que éste proporciona datos de microorganismos que son altamente sensibles a las alteraciones de su entorno, así como, presentan un corto tiempo de respuesta en comparación con los parámetros físicoquímicos. De modo que resulta prioritario entender y respetar las funciones ecológicas de los suelos y ecosistemas estratégicos como reguladores de los ciclos biológicos bajo el entendimiento de que constituyen un recurso de gran valor económico, cultural, científico y recreativo, cuya pérdida sería irreparable¹², siendo fundamental aumentar los esfuerzos para identificar, evaluar, mapear, monitorear y modelar la contaminación del suelo con el propósito de prevenir la exposición humana a los contaminantes, restaurar los sitios contaminados y, en última instancia, asegurar el uso del suelo¹³

3. OBJETIVOS

3.1 General

Analizar la calidad Microbiológica del suelo en el barrio Santa Cecilia-Suba, sector de la PTAR Salitre.

3.2 Específicos

- Describir los impactos ambientales en el suelo generados por el funcionamiento de la PTAR Salitre.
- Determinar parámetros físicos, químicos y microbiológicos en el suelo del Barrio Santa Cecilia, sector de la PTAR Salitre.
- Contrastar la presencia de los microorganismos aislados con la calidad microbiológica del suelo.

4. ANTECEDENTES

El suelo representa una superficie que cubre diferentes espacios en el planeta Tierra, en su esencia es una capa que interactúa con el medio ambiente con el fin de favorecer las condiciones de vida para los seres vivos como las plantas, animales, microorganismos, entre otros. Debido a esto, es indispensable que este medio se encuentre en óptimas condiciones de

supervivencia; es importante mencionar que frente a este contexto, los microorganismos juegan un papel importante como bioindicadores del suelo al estar en contacto muy cercano y continuo, tolerando la mayoría de los cambios que enfrenta este medio¹⁴. Así pues, diferentes factores como el clima, impactos antropogénicos, fábricas, industrias, presencia de sustancias tóxicas, alteran las características del suelo.

De acuerdo con lo anterior, Andreoni¹⁵, presentan un estudio y análisis microbiológico de muestras de suelo de diferentes sitios contaminados con hidrocarburos. Los suelos obtenidos se caracterizaron de acuerdo a sus propiedades físicas, químicas y microbiológicas mediante mediciones de pH, N total, C orgánico, distribución del tamaño de las partículas, humedad y contenido total de hidrocarburos. También, realizaron análisis de la actividad enzimática de la arilsulfatasa, fosfatasa, ureasa, deshidrogenasa y diacetato hidrolasa de fluoresceína. Al mismo tiempo, cultivaron bacterias heterótrofas en medios enriquecidos y posteriormente en medios con fenantreno para estudiar la degradación de este compuesto. Las bacterias se identificaron por métodos moleculares y el análisis de estos suelos contaminados evidenció propiedades químicas y microbiológicas diferentes, las cuales estaban sujetas a la variabilidad de las poblaciones microbianas dependiendo de las condiciones y características del suelo.

Por otra parte, Aguirre de Cárcer¹⁶ estudió las alteraciones estructurales y funcionales en suelo que se encontraba contaminado con policlorobifenilos luego de sembrar la planta *Salix viminalis*, la cual fue escogida por su característica remediadora a nivel rizosférico. Para este análisis, se obtuvieron muestras de suelo adherido a las raíces de la planta y se utilizaron métodos de extracción y purificación de ADN para la identificación de bacterias pertenecientes al género *Alphaproteobacteria*, *Betaproteobacteria*, *Acidobacteria*, *Eubacterias* y *Actinobacteria* utilizando cebadores específicos. Posteriormente se realizó una secuenciación y análisis filogenético. En cuanto a sus resultados se obtuvieron comunidades bacterianas dominantes, ya que las *Proteobacterias*, representaron el 52% en suelo rizosférico. Asimismo, se encontraron secuencias asociadas con *Pseudomonas spp*, las cuales son excelentes colonizadoras de esta parte del suelo, además, se estudiaron los perfiles metabólicos de los microorganismos, importante para el trabajo al relacionar la identificación de las enzimas producidas y su acción en el medio.

Otras investigaciones¹⁷, han abordado el estudio químico y microbiológico del suelo afectado por concentraciones de metales pesados en la atmósfera. En el análisis químico de las muestras se han utilizado varios parámetros como la conductividad eléctrica, pH, Na, Ca y K solubles en agua, nitrógeno soluble total y contenido de nitrógeno mineralizable. Respecto al estudio microbiológico se han tenido en cuenta la respiración basal, el número nematodos vivos, contenido de C y N relacionado con la biomasa microbiana y los coeficientes de funcionamiento de la comunidad microbiana como el cociente metabólico. Algunas conclusiones al respecto destacan que la contaminación por metales pesados altera significativamente la microflora del suelo, disminuyendo la formación de biomasa y aumentando el coeficiente metabólico, el cual mide la relación entre la respiración basal y la biomasa microbiana, de esta forma, el estudio propone un monitoreo ambiental con estos criterios de evaluación.

Al mismo tiempo, la investigación titulada *Enfoque microbiológico polifásico para la evaluación de la salud del suelo en un sitio contaminado italiano*¹⁸, evidencio que la calidad del suelo también puede ser evaluada indirectamente al relacionar parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, en donde se destacan estos últimos como bioindicadores. Este trabajo tuvo como finalidad integrar varios métodos (dependientes e independientes) de cultivo para mejorar la evaluación del suelo. Se realizó la caracterización química de varios tipos de suelos contaminados por diferentes sustancias al estar cercanos a zonas industriales, al igual que el análisis de la actividad de la microflora, utilización del carbono y densidad bacteriana. Los resultados obtenidos en cuanto a los métodos independientes de cultivo contribuyeron con información sobre la biodiversidad y microflora activa de toda la comunidad, las cuales fueron muy similares en sitios contaminados por metales pesados mientras que existen diferencias de la microflora presente en suelos contaminados por hidrocarburos aromáticos policíclicos. El estudio realizado proporciona información importante ya que este enfoque polifásico brinda herramientas para evaluar de manera multidisciplinaria las condiciones de vida del suelo¹⁸.

Alvarez⁷, por otra parte, estudió las alteraciones que puede ocasionar el fenómeno de la eutrofización en los ecosistemas, afectando las condiciones de los recursos naturales y alterando sus características propias. En la investigación se analizaron metodologías con el objetivo de eliminar la acumulación de estos nutrientes por la eutrofización, en particular del nitrógeno, en donde se estudiaron las transformaciones y el comportamiento en gran cantidad

del compuesto en el medio, como la inundación del suelo. Además, se demostró la capacidad de los humedales para eliminar el nitrato del agua, la cual depende de las características del ecosistema, como por ejemplo el potencial de la población microbiana, que cumple funciones importantes en el proceso, ya que los microorganismos pueden metabolizar el compuesto y transformarlo para liberarlo al ambiente.

En efecto, entre los grupos de microorganismos indicadores de contaminación del medio se encuentran los coliformes fecales y la bacteria *E. coli* como se menciona en el artículo denominado *Influencia de la temperatura en la evolución de la población de aerobios totales y de microorganismos patógenos en un suelo tratado con lodo de depuradora urbana*⁵⁵. En dicho estudio se describen a estos microorganismos como patógenos del suelo, debido a que se encuentran en gran cantidad en lodos de depuradoras de aguas residuales. Este tipo de suelo contiene altas cantidades de materia orgánica, lo cual incrementa la actividad microbiana y su diversidad de poblaciones en el medio.

Asimismo, los suelos que contienen poblaciones de hongos fitopatógenos indican la causa de efectos negativos en la cobertura vegetal, ya que estos microorganismos pueden ocasionar enfermedades y afectaciones en las plantas, originando al mismo tiempo un suelo afectado y deteriorado. Sin embargo, este impacto no solo se limita a los daños del medio y de la flora, si no que también puede afectar considerablemente tanto las cadenas tróficas de los organismos como las relaciones y actividad enzimática de los microorganismos presentes en el suelo.

4.1 Microorganismos como indicadores de la calidad del suelo

Los cambios temporales por actividades antropogénicas generan una pérdida progresiva de propiedades del suelo como su fertilidad. En ese sentido, Abril⁵¹ propone que los microorganismos del suelo pueden ser indicadores válidos para el diagnóstico de impacto y restauración en los ecosistemas debido a que la perturbación de los procesos biológicos, refiriéndose a los ciclos biogeoquímicos de los elementos como fósforo, nitrógeno, carbono, entre otros; realizados por la microbiota edáfica se puede reflejar en una degradación del suelo como un claro síntoma del mal uso y manejo inapropiado del mismo. Evidenciando la asociación que se presenta entre las comunidades microbianas y las propiedades del suelo. Es así como los microorganismos y sus funciones son altamente sensibles, cambiantes y a la vez

adaptativos en poco tiempo a cambios que presente su ecosistema, lo que permite correlacionar los cambios en las poblaciones microbianas con los impactos del suelo.

Los microorganismos (bacterias y hongos) del suelo desempeñan importantes funciones como las descritas en el trabajo de Delgadillo⁵², donde las poblaciones microbianas actúan en la asimilación, transformación y reciclaje de compuestos orgánicos en zonas de las aguas residuales domésticas como las encontradas en el sector de la PTAR salitre, siendo los primeros en colonizar estos medios y comenzar el proceso de descomposición y el uso de constituyentes disueltos presentes, siendo una gran herramienta en la evaluación de la calidad del suelo de este tipo de zonas, sin embargo las investigaciones y reportes en Colombia continúan siendo pocas. En relación con esto Avellaneda et al⁵³ reportan 1.060 morfotipos microbianos entre bacterias y hongos aislados de medios selectivos para grupos funcionales del suelo, como fijadores de nitrógeno, solubilizadores de fosfato y celulolíticos en un trabajo realizado para determinar la *Biodiversidad de grupos funcionales de microorganismos asociados a suelos bajo cultivo de papa, ganadería y páramo en el Parque Nacional Natural de Los Nevados, Colombia*, aportando datos importantes dada las condiciones ambientales extremas en las que se encuentra la biodiversidad de bacterias y hongos de los páramos colombianos.

Otros estudios sobre los microorganismos funcionales en suelos⁵⁴, han evaluado la densidad de las comunidades microbianas funcionales en dos tipos de suelos; las cuales están relacionadas en los ciclos de nutrientes del carbono, fósforo y nitrógeno. Se ha evidenciado que un posible fenómeno de competencia por nutrientes o espacio entre las dos poblaciones microbianas implicadas debido a la correlación negativa entre los solubilizadores de fosfato y los fijadores de nitrógeno. Adicionalmente Fabiani¹⁸, en su trabajo por medio de los métodos dependientes de cultivo obtuvo datos importantes de disminución de la densidad bacteriana y por ende, falta de actividad metabólica en suelos contaminados por la actividad industrial.

En relación con lo anterior, es clave mencionar la importancia de algunos grupos de microorganismos indicadores de la calidad del suelo, entre los cuales se encuentran los fijadores de nitrógeno, esto ha sido ampliamente estudiado en otros trabajos^{56,57}. Este grupo procariota de interés cumple una función elemental, ya que adhiere el nitrógeno atmosférico N₂ al suelo y de esta manera, es reducido a amonio con el fin de que el compuesto sea aprovechable en el medio, es decir, que se encuentra biodisponible para otros organismos y

plantas proporcionando estructura, fertilidad y una excelente fuente de nitrógeno orgánico e inorgánico, gracias a la dinámica microbiana.

De igual manera, los microorganismos solubilizadores de fosfato los cuales transforman el fósforo orgánico proveniente de la materia orgánica a un fósforo inorgánico, contribuyendo a que el compuesto esté disponible y pueda ser utilizado por la vegetación para su beneficio, favoreciendo su crecimiento y la solubilización y mineralización del fósforo, en donde hay una producción de ácidos orgánicos y fosfatasas que hacen el proceso efectivo en el medio^{56,57}. Adicionalmente, Lara⁵⁸, menciona que este grupo de microorganismos representan un 10% de la población microbiana del suelo. Entre los géneros encontrados se conocen los hongos como *Aspergillus sp*, *Fusarium sp* y *Sclerotium sp*; y las bacterias entre las que se pueden mencionar a *Bacillus sp*, *Flavobacterium sp*, *Burkholderia sp*, *Rhizobium sp* y *Pseudomonas sp*.

5. MARCO CONCEPTUAL

- **Bioindicador del suelo:** se consideran a los microorganismos como los mejores indicadores biológicos del suelo, ya que un suelo particular presenta características específicas basadas en la presencia, cantidad y diversidad de las comunidades microbianas, como por ejemplo los microorganismos autóctonos¹⁸
- **Calidad del suelo:** se presenta en un tipo de suelo que tiene la capacidad de realizar sus funciones vitales para sostener seres vivos, mantener la calidad ambiental y la salud de los hombres dentro de un ecosistema natural o antrópico⁴³, la cual se puede medir indirectamente relacionando parámetros de la microflora existente en el medio¹⁸.
- **Humedad del suelo:** es un valor que determina la relación entre la cantidad de agua en una cierta cantidad conocida de suelo que puede expresarse como porcentaje, agua por peso o volumen, o pulgadas de agua por pie de suelo.
- **Ph:** es una medida que representa la acidez o alcalinidad del medio.

- **Agua residual:** es el resultado del uso doméstico o industrial del agua, son llamadas también negras o cloacales.
- **Biosólido:** Son el principal subproducto del tratamiento de las aguas residuales, que contienen generalmente una alta concentración de nitratos y fosfatos, diferentes niveles de metales pesados dependiendo del tipo de agua residual (doméstica o industrial).
- **Eutrofización:** proceso por el cual un ecosistema o ambiente presenta una abundancia anormalmente alta de nutrientes procedentes normalmente de actividades humanas, que produce de manera general un aumento de la biomasa y un empobrecimiento de la diversidad.
- **Biomasa microbiana:** representa el componente vivo de la materia orgánica, conformado por bacterias, hongos, protozoos, entre otros. Se encuentra en la fracción débil del suelo, por lo cual es impactado y alterado fácilmente.
- **Rizosfera:** Es una zona de interacción y dinámica entre raíces de plantas y microorganismos del suelo. Siendo una región especializada caracterizada por el aumento de la biomasa microbiana y de su actividad.
- **Bacterias Fijadoras de Nitrógeno:** Grupo de microorganismos con la capacidad de transformar el nitrógeno no disponible a una forma de nitrógeno amoniacal disponible para ser utilizado por otros microorganismo y plantas manteniendo así la estabilidad de uno de los ciclo biogeoquímicos más importantes ya que así promueven el crecimiento y desarrollo de plantas en una zona⁴⁶.
- **Bacterias fosfato solubilizadoras:** Son aquellas bacterias involucradas en varios procesos para lograr la transformación del fósforo y así poder incrementar el desarrollo de plantas.
- **Bacterias nitrificantes:** se definen como el grupo de bacterias que oxidan el nitrito (NO₂) produciendo nitrato (NO₃), un compuesto más asimilable para las plantas.

- **Actinomicetos:** Microorganismos propios del suelo, los cuales generan enzimas y otros compuestos como vitaminas que ayudan a mantener el equilibrio ecológico, la estructuras del suelo y el olor a tierra en una zona determinada que está expuesta a contaminación y/o explotación agrícola⁴⁸.
- **Biomasa fúngica:** Su importancia radica en el suelo, cerca a las raíces, ya que permite la retención de nutrientes en las capas altas evitando que sean absorbidos por la materia orgánica o lavados.
- **Aerobios mesófilos:** son aquellas bacterias que se encuentran en gran cantidad en el suelo y se pueden desarrollar en un intervalo de temperatura amplio entre 25 y 40° C en aerobiosis. Estas pueden ser saprofitas y patógenas.
- **Nematodos:** estos intervienen en la descomposición de la materia orgánica del suelo, participan en la red trófica e intercambio de energía devolviendo los nutrientes al medio⁴⁹.

6. MARCO REFERENCIA

En Colombia, específicamente en el año 2012 se publica el *Programa Nacional de monitoreo y seguimiento de la degradación de suelos y tierras*¹⁹, este es un documento que describe la problemática del deterioro del suelo en Colombia, como una enfermedad grave que afecta de forma intrínseca varios aspectos importantes para el país; el programa se enfoca en la necesidad de implementar medidas y acciones pertinentes que realicen un seguimiento riguroso de la afectación del suelo, en donde el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), junto con el Ministerio de desarrollo Sostenible y varias instituciones relacionadas con la gestión de este recurso natural, coordinan el programa a través de diferentes componentes y estrategias a corto, mediano y largo plazo.

Se estima que en el país se descargan diariamente cerca de 700 toneladas de carga orgánica del sector doméstico urbano a los cuerpos de agua⁸, esta situación limita la disponibilidad del recurso en algunas regiones del país, sobre todo para consumo humano directo y recreativo. La sobresaturación de carga orgánica desequilibra los ecosistemas acuáticos y genera

condiciones anóxicas (sin oxígeno) de difícil recuperación esto incide en la vida de las comunidades acuáticas y generan procesos de eutrofización de lagos y lagunas debido al aumento desmedido de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo.

A nivel internacional, en el 2019, la FAO³, presenta el libro titulado ***La contaminación del suelo: una realidad oculta***, un informe a nivel mundial basado en la identificación de las fuentes de contaminación del suelo, con respecto a las principales sustancias tóxicas que se pueden encontrar y su afectación tanto en la salud humana como en la del medio ambiente. De acuerdo con este libro, se determinó que la simetría del suelo se está reduciendo en promedio 50 veces más al compararse con el tiempo y ritmo de su formación y renovación en la naturaleza. Esto sucede, debido a que se producen alteraciones en la microflora, disminuyendo su cantidad y actividad enzimática, la cual es esencial para favorecer y proteger la salud del suelo. Estas perturbaciones en el medio tienen un gran impacto ecológico negativo, las cuales ocasionan pérdidas en la calidad del suelo y con ello, la pérdida de capacidad productiva.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente y entendiendo que el sector de la PTAR Salitre, ubicado en el barrio Santa Cecilia es un espacio con características ecológicas asociadas a un humedal, y que de hecho hace algunos años era clasificado como tal, es importante reconocer algunos aspectos importantes con respecto a este tema. De acuerdo con el trabajo realizado por Moreno et al²⁰, Los humedales según la Convención de Ramsar, son reconocidos como las extensiones de marismas, pantanos o turberas cubiertas de agua, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las de extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda seis metros. En este mismo trabajo, se describen también los tipos de humedales: estuarios, marinos, fluviales y palustres, y su importancia como “Riñones del Medio Natural”.

En el libro titulado ***Protocolo de Recuperación y Rehabilitación Ecológica de Humedales en Centros Urbanos***, escrito por Van der Hammen et al²¹, se incluye información sobre la geología, geomorfología, suelos, vegetación, limnología y fauna de los ecosistemas de humedal, según bases científicas y expertos, estas reservas naturales son consideradas como ecosistemas de importancia para la conservación en el primer Plan de Ordenamiento Territorial, pero aun así, siguen en estado de deterioro y eutrofización, por lo cual es

indispensable implementar procesos que conduzcan al restablecimiento, ya sean de la estructura y/o función(es) de los mismos, los cuales requieren de suficiente conocimiento científico y un periodo de tiempo a largo plazo²¹. Estos procesos son claves para la recomposición de las zonas, ya que en varios estudios²² se demuestra que el aumento de asentamientos urbanos en zonas verdes causados por el crecimiento poblacional tiene gran impacto en la transformación de los humedales; allí, se presentan conflictos extrínsecos relacionados con los límites de Bogotá e intrínsecos que abarcan a los humedales, los cuales presentan entre otros aspectos incongruencias en los Planes de Ordenamiento Territorial por lo cuál es fundamental articular lo ambiental con lo urbano, incentivando la concientización de la importancia de restaurar y proteger estos espacios, desde la formulación de planes hasta la participación de la comunidad de su alrededor.

En ese sentido deben promoverse trabajos que permitan hacer una caracterización de las coberturas vegetales de estos espacios, con el fin de identificar los cambios que puedan presentarse ante una perturbación, estudios multitemporales por ejemplo podrían generar información que permita proponer acciones de restauración en contextos específicos, locales y regionales, tratando de evitar alteraciones irreversibles de los procesos hidrológicos que caracterizan los ecosistemas de humedal²³ La conducta ineficiente de la sociedad, que incluye una planificación inadecuada, políticas inconsistentes, además de instituciones e instrumentos de manejo inapropiados; demuestran la necesidad de realizar prácticas de conservación y planes de manejo basados en las características locales y de las unidades de cobertura vegetal, son requeridas para la restauración ecológica de los humedales. Frente a esta situación se conoce que los humedales ubicados en la ciudad de Bogotá han disminuido su extensión más del 80%, entre los años 1950, 1989 y 2016, esto como consecuencia de la construcción de viviendas y de la necesidad de implementar infraestructuras de servicios y saneamiento básico²⁴.

En consecuencia algunas estrategias a nivel local y global han empezado a surgir en respuesta a esta problemática, permitiendo promover planes y programas que promueven la recuperación y conservación de los humedales, como el Plan de Andaluz Humedales en España, el cual integra todos los programas de protección, recuperación y conservación, el Qunli Parque de Humedales de Aguas lluvias en China, en donde transformaron el humedal en una “esponja verde” en combinación con un parque urbano de aguas pluviales multifuncional, el cual recoge, filtra y almacena dichas aguas, fomentando espacios

recreativos y estéticos en la ciudad. Otra estrategia, es la propuesta para la protección y la conservación del humedal Tierra Blanca, en el municipio de Soacha, con el fin de realizar procesos de limpieza del espejo de agua, implementar la educación ambiental, ofertas laborales, entre otros. Así mismo, el proyecto LIFE Humedales de La Mancha en España, incentiva la recuperación de praderas salinas, mejora del hábitat de aves, realiza la construcción de un filtro de macrofitas en flotación, elimina de escombreras, y desarrolla la reforestación con especies nativas²⁵.

7. MARCO LEGAL

Decreto 2811 de 1974 por el cual se dicta el ***Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente***²⁶, tiene como objetivo conservar y manejar adecuadamente estos recursos y evitar la explotación de los mismos, así como, implementar medidas de orientación y regulación de las actividades antropogénicas que ocasionan afectaciones en el ambiente. Este código indica que el protocolo para hacer uso de cualquier tipo de suelo debe ser un proceso riguroso, en cuanto a su análisis estructural y fisiológico, ya que la identificación de sus condiciones y características particulares previamente, contribuyen a emplear de manera adecuada el potencial del suelo para actividades específicas, protegiendo de esta manera su integridad física y capacidad productora. Allí se mencionan los factores que pueden deteriorar el ambiente y de la misma forma, se describen las facultades administrativas y funciones que tiene el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial como la implementación de políticas integrales que aseguren el aprovechamiento sostenible del suelo y la regulación del saneamiento del recurso natural impactado por diversas actividades que lo afectan directa o indirectamente.

Decreto 3100 de 2003²⁷, sobre Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos, PSMV, y otras determinaciones, contempla programas, proyectos y actividades con la finalidad de implementar un adecuado tratamiento de los desechos, desde su recolección, transporte, tratamiento y disposición final de aguas residuales al alcantarillado. En ese momento, el Ministerio ya había autorizado los vertimientos de lodos en el relleno sanitario Doña Juana a través del operador autorizado BOGOTÁ LIMPIA SA ESP.

Resolución 0170 de 2009 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS)²⁸, declara en Colombia el año 2009 como año de los suelos y el 17 de junio como Día Nacional

de los Suelos y se adoptan medidas para la conservación y protección de los suelos en el territorio nacional. Además, se mencionan las medidas y acciones pertinentes para la conservación del suelo, así como las medidas complementarias que con ayuda de diferentes entidades se busca promover e intensificar acciones que disminuyan el impacto que ha tolerado el medio ambiente.

De esta manera, el **Decreto 1287 DE 2014**²⁹, establece los criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, ya que estos subproductos obtenidos requieren de varios procesos de estabilización para reducir las sustancias tóxicas que presentan. El objetivo es realizar una caracterización química y microbiológica de los biosólidos generados, como en la PTAR Salitre, luego se hace una comparación con los valores máximos permisibles de las diferentes sustancias y de esta manera, se puede clasificar y categorizar como A o B para ser empleado en diferentes alternativas de uso como en la restauración de suelo deteriorados por diversos factores.

Decreto 1076 de 2015 Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible³⁰, representa el decreto único reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible en relación con los consejos ambientales regionales de la macrocuencas (CARMAC), el Ordenamiento del recurso hídrico y Vertimientos y se dictan otras disposiciones. Este indica que el MADS debe cumplir su función como rector de la gestión ambiental y de los recursos naturales, quien debe guiar y definir las políticas necesarias para restaurar, conservar y proteger los ecosistemas, al igual que se encarga de dirigir el Sistema Nacional Ambiental (SINA). También, se presentan las medidas obligatorias que se deben tener en cuenta para la protección y conservación del suelo, en donde es primordial mantener la cobertura vegetal del suelo, hacer uso de técnicas adecuadas que no afecten este recurso, evitar la construcción obras no indispensables, entre otros.

Resolución 0631 de 2015 del MADS³¹, establece los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.

Plan de manejo del humedal Juan Amarillo de 2010, presentado por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá³² ante la Secretaria Distrital de Ambiente, este documento se basa en la normatividad ambiental vigente enfocado en los humedales, los

cuales hacen parte integral de la Estructura Ecológica Principal de la ciudad, y son destinados a la preservación, restauración y aprovechamiento sostenible de elementos que los conforman para ofrecer educación ambiental y recreación pasiva. Para la formulación de este plan, se describen los principales factores que presentan la problemática ambiental del humedal, entre los cuales se encuentra: la presencia de infraestructuras no adecuadas para el humedal como urbanizaciones, pavimentos, excavaciones, contaminación hídrica por conexiones erradas, descarga de basuras y escombros dentro del humedal, perturbación de la fauna por ruido y en general actividad antrópica, al existir senderos peatonales paralelos, y otros elementos complejos que perjudican este ecosistema. Para mitigar estos factores tensionantes que impactan negativamente al humedal, el programa propuso cinco estrategias: a) Investigación participativa y aplicada. b) Educación, comunicación y participación para la construcción del territorio. c) Recuperación, protección y compensación. d) Manejo y uso sostenible. y f) Gestión Interinstitucional

8. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La planta de tratamiento de aguas residuales PTAR Salitre, se encuentra ubicada al noroccidente de la ciudad de Bogotá D.C, en la antigua zona del humedal El Cortijo, donde se une el humedal Juan Amarrillo o Tibabuyes con el caudal del Río Bogotá (Figura 1). Allí se tratan aguas residuales del norte de la ciudad, generadas por más de dos millones de bogotanos, principalmente de hogares, oficinas, colegios, universidades y pequeñas industrias, entre otros. De esta manera, se asegura que las aguas de la planta vertidas al Río Bogotá tras el proceso de tratamiento contribuyan al saneamiento del principal afluente de la ciudad.



Figura 1. a) Imagen aérea de la zona PTAR Salitre, Bogotá ⁶³. **b)** Imagen Satelital zona PTAR Salitre, tomado de: Google Maps 2021

Aunque la PTAR Salitre, en su proceso final ayuda al saneamiento del Río Bogotá, también permite la descontaminación de las aguas residuales que capta en la cuenca del río Salitre, humedal Torca y humedal La Conejera, estos son impactados por la ubicación de poblaciones e industrias de la zona urbana Santa Cecilia sobre los cursos de los afluentes del río Bogotá las cuales son Juan Amarillo, Salitre, San Cristóbal, Fucha, Tunjuelo, lo que trae como consecuencia vertimientos de desechos domésticos e industriales. Además, la actividad minera en los Cerros Orientales y en la cuenca baja del Tunjuelo, también provoca un aumento en la carga mineral en el medio, siendo evidente la problemática de contaminación y disminución de corrientes superficiales afluentes de los humedales. La zona de la PTAR Salitre donde transita el caudal del río de Bogotá, presenta malos olores y al mismo tiempo, se observa una alteración de la cobertura vegetal del suelo cercano a la zona.

Para realizar el muestreo se tuvieron en cuenta dos fragmentos de suelo (Figura 2). El primer fragmento se encuentra delimitado entre el Río Arzobispo y la avenida que conecta el barrio Lisboa con la calle 80. Este espacio es un lugar recreativo que cuenta con algunas canchas de fútbol y se observa frente al barrio Santa Cecilia. Por otro lado, como segunda fracción a estudiar, se obtendrá muestras del lugar ubicado en la división del curso del Río de Bogotá. Esta zona del suelo se encuentra en contacto con las fábricas visualizadas por la calle 80, saliendo de la ciudad.

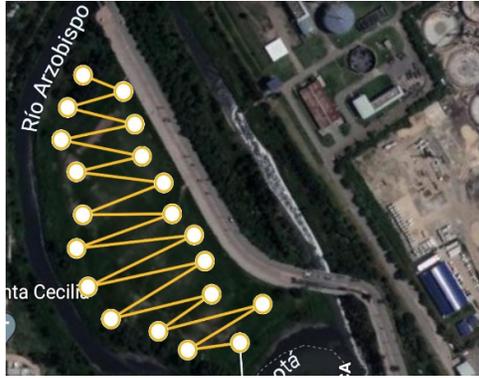


Figura 3. Imagen de satélite de la zona de muestreo aleatorio simple en zig zag (Fragmento 1). Tomado de: Google Maps 2021, modificado por las autoras.



Figura 4. Imagen de satélite de la zona de muestreo aleatorio simple en zig zag (Fragmento 2). Tomado de: Google Maps 2021, modificado por las autoras.

9.2. Análisis fisicoquímico

Para este análisis de suelo se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros: color, textura, pH y humedad relativa, micronutrientes disponibles (Nitrógeno total y fósforo total) y medición de metales pesados (Plomo, Cadmio y Mercurio).

- **Determinación de color:** se utilizó la tabla de color de Munsell, ya que esta cuenta con las características de HUE (matiz), VALUE (claridad) y CHROMA (pureza) con el fin de compararlas con la muestra y realizar el análisis respectivo.

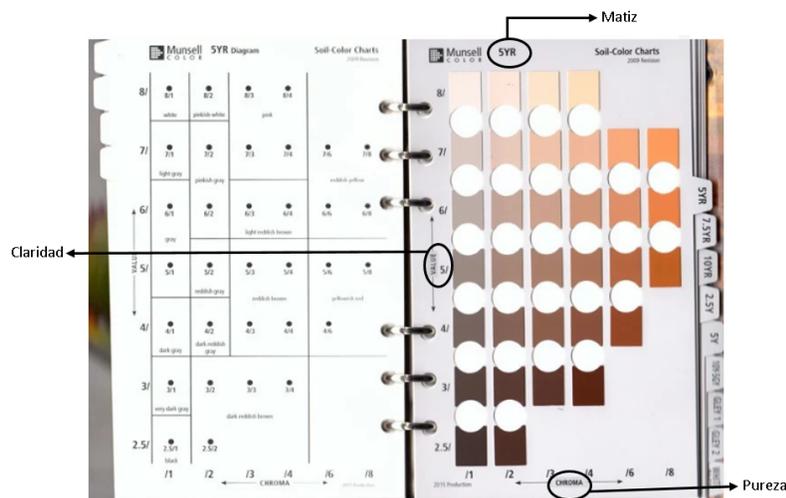


Figura 5. Tabla de color de Munsell. Elaboración propia. 2021. Adaptación de las autoras: Suárez E, Silva E, Ramos C, 2020.

- **Textura:** se realizó por medio de la observación directa y contacto, agregando una cantidad de suelo en la palma de la mano con unas gotas de agua. Luego, se debe amasar el suelo realizando diferentes formas para identificar su textura.

Tabla 1. Texturas del suelo.

| FORMA DEL SUELO | | TEXTURA |
|--|--|-----------------------|
| Bola | Se desmorona | Arena |
| | Mantiene la cohesión | - |
| Cilindro de 6 a 7 cm, de longitud | No mantiene la forma | Arenoso franco |
| | Si mantiene la forma | - |
| Cilindro de 6 a 7 cm, de longitud | No mantiene la forma | Franco arenoso |
| | Si mantiene la forma | - |
| Semicírculo, doblando el cilindro | No mantiene la forma | Franco |
| | Si mantiene la forma | - |
| Círculo cerrado | No mantiene la forma | Franco pesado |
| | Se forman ligeras grietas en el cilindro | Arcilla ligera |
| | Cilindro sin grietas | Arcilla |

Adaptación del autor: Lagos JA, 2017 por las autoras, 2021.

- **Medición de pH:** se deben pesar 10g de suelo y colocarlo en una vaso precipitados de 100ml, luego se debe agregar 20ml de agua destilada. Posteriormente, se agita y se deja reposar 10 minutos. Al mismo tiempo, se ajusta el potenciómetro con las soluciones amortiguadoras y se procede a medir el pH, finalizado el tiempo en reposo.
- **Determinación de la humedad relativa:** inicialmente se pesan 10 g de suelo sobre un papel de aluminio a peso constante, luego se coloca la muestra dentro del horno a 80°C de 12 a 24 horas. Posteriormente, se debe sacar la muestra y colocarla dentro de un desecados para que se enfríe. Pasado el tiempo, se pesa la muestra y se registran

los datos obtenidos. Para obtener el resultado de este parámetro se debe calcular los porcentajes de humedad del suelo por la diferencia de peso:

$$\% \text{Humedad del suelo} = (\text{Peso inicial} - \text{Peso final}) / \text{Peso Inicial} * 100$$

- **Pruebas químicas:** en este análisis para la determinación de nitrógeno total, se realizó el procedimiento denominado Método de Kjeldahl, el cual consiste en la digestión de la muestra con ácido sulfúrico H_2SO_4 y una serie de catalizadores⁵⁹. En este caso, se cuantifican todas las formas del elemento, es decir, tanto su forma inorgánica como orgánica. En el caso de la cuantificación de fósforo total, la medición se realizó teniendo en cuenta el Método Bray II, el cual es utilizado para suelos ácidos. Y por último, para la medición de metales pesados (Pb,Cd,Hg), las muestras se dirigieron con HNO_3 /HCl utilizando el método EPA. Estas pruebas se realizaron en el Laboratorio de suelos y aguas del Centro de Biosistemas de la Universidad Jorge Tadeo Lozano.

9. 3. Análisis microbiológico

- **Aislamiento primario:** para el aislamiento primario se tomaron 10 g de suelo en 90 ml de solución salina esteril, a partir de esta dilución inicial se prepararon diluciones sucesivas tomando 1 ml de solución inicial y adicionando a tubos con 9 ml de solución salina esteril hasta la dilución 10^6 y finalmente hacer siembra de 0.1 ml por el método de extensión en Agar Chapman TTC para microorganismos indicadores de contaminantes y Agar YMA, SMRS para Microorganismos de grupos funcionales (Figura 6-7). y Agar PDA y Rosa Bengala para hongos.

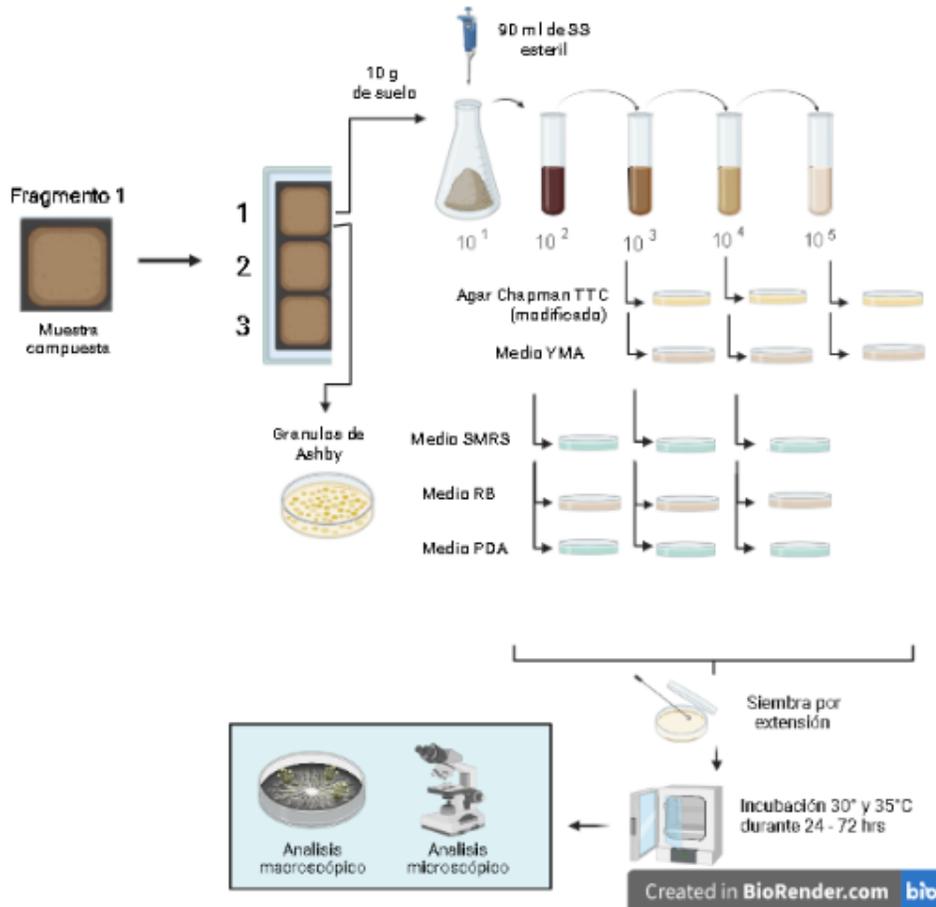


Figura 6. Diagrama de flujo para el análisis microbiológico de muestras compuestas de suelo, (Fragmento 1 y 2). *Elaboración propia con Biorender. 2021*

- **Granulos de Ashby:** para el aislamiento de microorganismos fijadores de nitrógeno en especial del género *Azotobacter* sp. por medio de la técnica de gránulos en medio Ashby (Fenglerowa, 1995) la cual consiste en localizar 25 gránulos del suelo en cuadrícula, posteriormente se incuba de 2-5 días a 27°C y se calcula por porcentaje las colonias representativas de microorganismos fijadores de nitrógeno (Figura 7).
- **Aislamiento secundario:** una vez identificadas las posibles colonias de interés en este estudio, a partir del aislamiento primario se realiza un segundo aislamiento por la técnica de agotamiento en medios de cultivo específicos esto con el fin de aislar más específicamente los microorganismos de interés y se mandan a incubar (Figura 7).

- **Caracterización macroscópica y microscópica:** a partir de un segundo aislamiento se realizó la identificación de las colonias teniendo en cuenta características macroscópicas de forma, color, tamaño y consistencia y se identificó la morfología microscópica mediante tinción de Gram para bacterias e improntas con azul de lactofenol para hongos (Figura 7).



Figura 7. Foto de las autoras: Desarrollo de la metodología en el laboratorio, 2021

- **Pruebas bioquímicas:** Luego del segundo aislamiento, se seleccionaron cinco colonias representativas para realizar pruebas bioquímicas. Para este análisis se utilizó el panel BBL CRYSTAL Enteric/ Nonfermenter Identification Color Chart, con el objetivo de hacer una aproximación al género y especie de las colonias obtenidas.

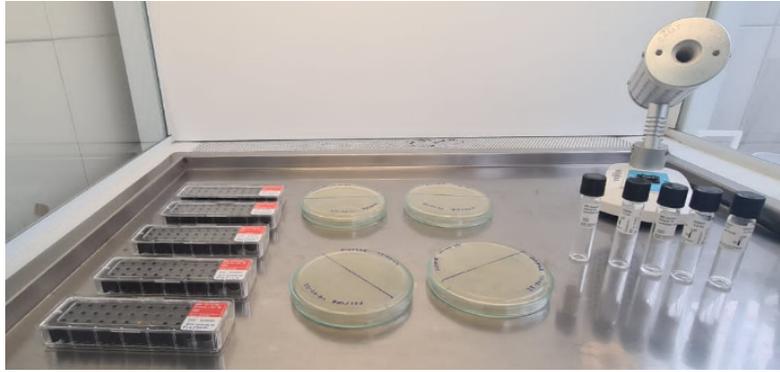


Figura 8. Montaje de BBL CRYSTAL en el laboratorio. Foto tomada por las autoras, 2022.

10. RESULTADOS

10.1. Identificación de la zona y obtención de la muestra

Luego de varias visitas en la zona (fig. 9), se identificó que el fragmento 1 tiene proximidad con el río Arzobispo (desembocadura del humedal Juan Amarillo), zona residencial (barrio Santa Cecilia), desembocadura del agua de la PTAR Salitre, el río Bogotá y una avenida (conexión Lisboa-calle 80). Por medio del reconocimiento de la zona se evidenció la intervención de la comunidad en actividades como: arrojar basura, escombros y elementos de desecho, como consecuencia se presentan malos olores e insectos debido a la contaminación del agua, espuma blanca que sale del agua procesada por la PTAR Salitre, además de evidencia de fogatas realizadas en la zona.

Por otra parte, el fragmento 2 se encuentra delimitado por una zona industrial, una zona tipo humedal y el río Bogotá. Allí se evidenció mal olor, insectos, desechos provenientes de las fábricas de la zona industrial y que usan el pasto para alimentación de un pequeño ganado. A partir de esto, se seleccionaron aleatoriamente tres submuestras de cada fragmento, es importante mencionar que se tomó la misma cantidad de cada submuestra para finalmente obtener 6 muestras representativas (Fig. 10) de la zona para el análisis fisicoquímico y microbiológico del suelo.



Figura 9. Foto de las autoras, actividades antrópicas observadas alrededor de la zona en estudio, 2021.



Figura 10. Foto de las autoras, muestras representativas de la zona (Fragmento 1 y 2), 2021

10.2. Análisis fisicoquímico

Mediante el uso de las técnicas sensoriales se obtuvo que el color predominante del suelo fue marrón rojizo oscuro y en cuanto a su textura, se encontró un suelo arcilloso variando ligeramente entre el fragmento 1 y 2, como se muestra en las siguientes tablas. Asimismo, se presentan los datos obtenidos de pH y humedad relativa de cada muestra.

Tabla 2. Resultados del análisis del color del suelo (Fragmento 1 y 2),

| DETERMINACIÓN DEL COLOR | | | | |
|--------------------------------|--------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| Muestra | HUE (matiz) | VALUE (claridad) | CHROMA (pureza) | Notacion Munsell |
| Frag.1 | 5YR | 3 | 4 | Marrón rojizo oscuro |
| Frag.2 | 5YR | 3 | 4 | Marrón rojizo oscuro |

Elaboración propia, 2021

Tabla 3. Resultados del análisis fisicoquímico (Fragmento 1 y 2).

| Parámetro fisicoquímico | Resultado | |
|-------------------------|----------------|-------------|
| | Fragmento 1 | Fragmento 2 |
| Textura | Arcilla ligera | Arcilla |
| pH | 5.4 | 4.8 |
| Humedad relativa | 33% | 23% |
| N-Total | 0.93% | 0.29% |
| P | 65.5 mg/kg | 55.6 mg/kg |
| Pb | 31,80 mg/kg | 19,84 mg/kg |
| Cd | 0,74 mg/kg | 0,69 mg/kg |
| Hg | 0,21 mg/kg | 0,25 mg/kg |

Elaboración propia. 2022

10.3. Análisis microbiológico

Las muestras de los fragmentos 1 y 2 se cultivaron en los medios de agar Chapman TTC (modificado con maltosa y cristal violeta), agar YMA, agar Ashby; con el fin de obtener grupos de microorganismos específicos y posteriormente, realizar conteo de Unidades formadoras de Colonias (UFC).

Aislamiento primario: para microorganismos indicadores de contaminación del suelo se sembraron las muestras de suelo en agar Chapman TTC (modificado con maltosa y cristal violeta) donde se obtuvo crecimiento y desarrollo de bacterias probablemente contaminantes.. Se realizó el conteo de UFC, en todos los casos los recuentos fueron resultado $>1 \times 10^5$ UFC y se identificaron las colonias representativas de acuerdo a sus características macroscópicas como el color, aspecto y forma de crecimiento, tanto de las colonias que crecieron en todos los medios como las que crecieron solo en algunas cajas del cultivo. Entre las colonias de interés, se observaron varias de color amarillo con centro anaranjado de bordes regulares. También, se obtuvieron colonias verdosas con aspecto mucoso debilmente fermentadoras de maltosa, puesto que el medio no viro totalmente al color amarillo.

Otras colonias de interés, se observaron pequeñas de color blanco traslucido y debilmente fermentadoras de maltosa. Posteriormente, la tinción de Gram de las colonias evidencio

bacilos y cocobacilos Gram negativos (Tabla 4), con base en las características mencionadas, algunas colonias fueron seleccionadas para realizar pruebas bioquímicas a partir de un segundo aislamiento.

En relación con los grupos funcionales se obtuvo crecimiento en el agar YMA, específico para microorganismos fijadores de nitrógeno como *Azospirillum sp* y *Rhizobium sp*; el crecimiento promedio evidenciado fue: 9×10^5 de *Azospirillum sp*. y 2×10^5 de *Rhizobium sp*. para el fragmento 1; y un promedio de 1×10^4 y 2×10^4 respectivamente en el fragmento 2.

Algunas colonias presentan características macroscópicas típicas para los géneros de interés y como resultado de la Tinción de Gram se observan población mixta con predominio de bacterias Gram negativas con variabilidad morfológica entre bacilos curvos y pequeños (Tabla 4). Adicionalmente se realiza un segundo aislamiento para realizar pruebas bioquímicas junto otras bacterias Gram negativas sin características macroscópicas propias o típicas.

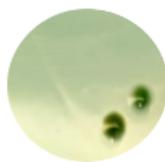
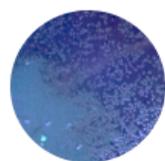
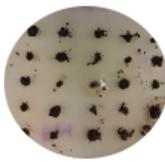
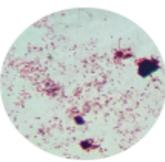
En el Agar SMRS se observó la acción fosfato solubilizadora de algunas colonias que generaron un halo amarillo en el medio con una concentración promedio de crecimiento de $1-3 \times 10^7$ UFC/gr de suelo para ambos fragmentos analizados, donde el predominio morfológico fue de bacilos gram variables, algunos Gram Negativos y otros Gram positivos. Sin embargo, solo se obtuvo crecimiento de un hongo fosfato solubilizador.

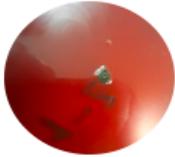
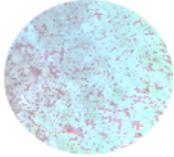
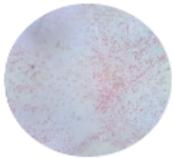
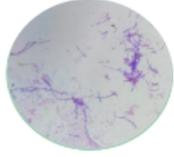
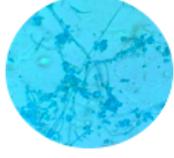
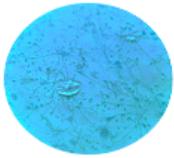
En los resultados obtenidos para el método de gránulos de Ashby se observó crecimiento característico del género *Azotobacter sp* con porcentajes de recuperación entre 38 - 60 % con un promedio del 51.9 % para el fragmento 1 y del 47.0 % para el fragmento 2. A partir de la Tinción de Gram se evidenciaron bacilos Gram negativos pleomórficos con variabilidad entre bacilos y cocobacilos (Tabla 4)

Con respecto a los hongos, a partir del crecimiento y desarrollo de colonias en agar PDA se lograron identificar por observación macroscópica y microscópica a través de la técnica de improntas con azul de lactofenol y claves taxonómicas los hongos del género *Fusarium sp*. *Aspergillus sp*. *Pythium sp*, *Penicillium sp*, hongos considerados saprófitos, ambientales y en algunos casos fitopatógenos. En el Agar Rosa de Bengala (RB), específico para hongos

filamentosos se observó crecimiento micelial de diferentes tipos, de acuerdo con la identificación macroscópica y microscópica por medio de improntas con azul de lactofenol y claves taxonómicas se encontraron hongos de interés del género *Mucor sp*, *Trichoderma sp* y *Penicillium sp* (Tabla 4).

Tabla 4. Caracterización Morfológica de Microorganismos Aislados.

| MEDIOS DE CULTIVO | CARACTERIZACIÓN MACROSCÓPICA Y MICROSCÓPICA DE LOS MICROORGANISMOS | | |
|---|---|---|--|
| Agar Chapman TTC (modificado con Maltosa y Cristal violeta) |  |  | <p>BF1-1: Colonias amarillas con centro anaranjado, el medio de cultivo se tornó de color amarillo, a la tinción de Gram se observaron bacilos Gram negativos.</p> |
| |  |  | <p>BF1-2: Colonias blanquecinas de aspecto cremoso, no fermentadores de maltosa, el medio de cultivo tiene color azul. Bacilos Gram negativos.</p> |
| |  |  | <p>BF1-3: Colonias de color verde y aspecto cremoso, el medio de cultivo tiene color verde, se observan Bacilos Gram negativos</p> |
| |  |  | <p>BF1-4: Crecimiento de colonias pequeñas de color blanco traslucido, no fermentadores de maltosa. El medio de cultivo se observa de color azul. Bacilos Gram negativos.</p> |
| Agar Ashby |  |  | <p>BF2-1: Crecimiento de colonias blanquecinas con bordes irregulares, convexas de aspecto mucoide. Se observan coco bacilos pleomórficos Gram negativos.</p> |

| | | | |
|---------------|---|---|--|
| Agar YMA |  |  | BF2-2: Crecimiento de colonias elevadas, de color rojo escarlata oscuro, se observan Bacilos Gram Negativos Irregulares algunos agrupados. |
| |  |  | BF2-3: Crecimiento de colonias pequeñas de color rosáceo brillantes, se observan pequeños Bacilos Gram Negativos. |
| Agar SMRS |  |  | BF2-4: Crecimiento de colonias de color naranja, grandes, opacas con bordes regulares, observaron bacilos Gram positivos y Gram negativos. |
| Agar PDA y RB |  |  | HF2-1: Colonias de crecimiento rápido, formando pústulas verdes o amarillentas por toda la placa. Se observan hifas septadas, fiálides laterales, conidias en racimos compatibles con <i>Trichoderma</i> spp. |
| |  |  | HF2-2: Colonias de color blanco, rosa pálido, crecimiento de micelio algodonoso como un fieltro. Se observan macroconidias y microconidias, hifas septadas hialinas, conidióforo da origen a microconidias, fiálide da origen a macroconidias compatibles con <i>Fusarium</i> spp. |
| |  |  | HF2-3: Colonias planas, aterciopeladas, de crecimiento presentando color blanco inicialmente y cambia a amarillo grisáceo, marrón o pardo dependiendo de la especie. Se observan conidias, hifas septadas hialinas, conidióforo ramificado, fiálides, largas y terminan en punta compatibles con <i>Paecilomyces</i> spp. |

Elaboración propia, 2021 - 2022.

La cuantificación de las colonias se obtuvo a partir de la dilución sembrada por la cantidad de UFC (unidades formadoras de colonia) o crecimiento miceliar que se obtuvo en cada medio de cultivo, donde en la mayoría de los casos para bacterias la última dilución en la que se observó crecimiento fue $10e^{-4}$ y/o $10e^{-5}$ en Agar Chapman TTC (modificado), YMA,

SMRS y para hongos en las diluciones 10e-2 y 10e-4 en Agar PDA y Agar RB, respectivamente. Todos los resultados de los recuentos se encuentran consignados en Anexo 1

Aislamiento secundario: para el segundo aislamiento a partir del agar Chapman, se obtuvieron en agar nutritivo las siguientes colonias: cuatro pertenecientes a la muestra del Frag. 1 y dos del Frag. 2 para un total de seis colonias, a las cuales se les realizó tinción de Gram y prueba de catalasa y oxidasa. Se seleccionaron tres colonias del fragmento 1 y una del fragmento 2 representativas para realizar pruebas bioquímicas de identificación.

Por otro lado, a partir de medio YMA, de las cuatro colonias aisladas relacionadas con el género *Azospirillum sp* y *Rhizobium sp*, no se obtuvo crecimiento en agar nutritivo. Sin embargo, de las otras cuatro colonias sin características macroscópicas típicas se logró obtener cultivo suficiente de una colonia Gram negativa perteneciente al fragmento 1, a la cual se le determinó oxidasa, catalasa y panel de pruebas bioquímicas para Gram negativos.

Tabla 5. Función de los microorganismos aislados

| Microorganismos Aislados | | Actividad / proceso asociado |
|--------------------------|---|---|
| Bacterias | Coliformes totales y <i>E coli</i> <i>Kluyvera cryocrescens</i> | Indicadores de contaminación |
| | Fosfato solubilizadoras | Solubilizar Fosfato |
| | <i>Rhizobium sp</i> , <i>Azospirillum sp</i> , <i>Azotobacter sp</i> | Fijación de nitrógeno |
| | <i>Pseudomonas putida</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Citrobacter freundii</i> | Contaminantes, Microorganismos con potencial para biorremediar ambientes contaminados. |
| Hongos | <i>Penicillium sp</i> , <i>Aspergillus sp</i> , <i>Mucor spp.</i> | Saprofitos |
| | <i>Fusarium spp</i> | Ambiental, Fitopógeno |
| | <i>Paecylomices sp</i> | Control Biológico |

Elaboración propia, 2022

10.4. Pruebas Bioquímicas

A partir de los crecimientos de las cinco cepas seleccionadas se realizó el montaje en El BBL CRYSTAL para bacterias Gram Negativas, obteniéndose una aproximación a la identificación de las bacterias aisladas, para las muestras del fragmento 1, se encontraron géneros como *Escherichia coli*, *Citrobacter freundii*, *Kluyvera cryocrescens*, *Pseudomonas putida* y del fragmento 2 se obtuvo coincidencia con *Pseudomonas aeruginosa*. Ver tabla de resultados en el anexo 2.

11. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El análisis de las muestras obtenidas a partir del suelo de la PTAR Salitre (fragmento 1 y 2 - Santa Cecilia, Suba) evidenció que algunos parámetros se encuentran por debajo de los rangos adecuados en comparación con la salud del suelo, esto quiere decir, con las características fisicoquímicas de un suelo que permita el desarrollo de diferentes procesos como el transporte de nutrientes, reacciones de los compuestos, adsorción de contaminantes, entre otros⁶³. Algunas de las características fisicoquímicas del suelo como el color (Marrón rojizo oscuro), se encontraron asociadas a un alto contenido de materia orgánica, principalmente compuesta por humus, así mismo, el color rojizo indica la oxidación de minerales como el hierro⁶¹. Este color también está relacionado con suelos de textura arcillosa, como se evidencia en los resultados obtenidos; estos suelos contienen partículas minerales muy pequeñas de textura fina que no forman agregados de suelos, sino que se observan compactados y son muy comunes en donde no se han desarrollado cultivos y donde por lo general no hay diversidad de microorganismos presentes, lo cual podría asociarse a una disminución en los procesos biológicos que se desarrollan en el suelo analizado ⁶².

Por otra parte, la humedad relativa del suelo se representa como el porcentaje del peso del agua en una determinada masa compuesta por las partículas sólidas del mismo. Esta cantidad de agua se puede encontrar de dos formas, la primera es adsorbida en las superficies internas y la segunda, es condensada en los poros pequeños del suelo⁶⁴. En este caso, la humedad relativa del fragmento 1 y 2, se encontró en 33% y 23% respectivamente, indicando que es ideal con respecto a la máxima capacidad de retención o capacidad de campo (5-50%). Teniendo en cuenta que la muestra se sometió previamente al secado en un horno a 80°C durante 12 a 24 horas, se obtuvo un alto porcentaje de humedad, esto coincide con el tipo de suelo, ya que los suelos arcillosos presentan alta capacidad de campo.

Con relación al pH del suelo analizado, este se encontró entre 4 a 5.5, presentándose un nivel de acidez moderado a extremo, esto se relaciona directamente con los microorganismos presentes, además esta característica sugiere que algunos micronutrientes van a estar disponibles en menor o mayor cantidad, dependiendo del elemento. En este caso el nitrógeno total del suelo se encontró disminuido⁶³ (Frag 1: 0.93% y Frag 2: 0.29%), debido a que este compuesto está en mayor cantidad a un pH neutro, aunque, es importante mencionar que la cantidad de nitrógeno total varía bastante con las condiciones ambientales, como la temperatura y humedad, las cuales se deben que conservar al momento de recolectar la muestra. Por el contrario, el fósforo total se encontró dentro del rango alto (40 - 100 mg/kg)⁶² y al igual que el nitrógeno está presente en mayor cantidad en suelos con pH neutro, sin embargo, el aumento de fósforo puede darse debido a que las muestras obtenidas se recolectaron a poca profundidad del suelo, en donde se presentan gran cantidad de residuos vegetales que ocasionan que este elemento aumente⁶³. Posiblemente, la acidificación de estos suelos es una de las consecuencias de la eliminación de gran cobertura vegetal de la zona de estudio, antes conocida como humedal el Cortijo, así como, el contacto con residuos de contaminantes químicos producidos por la PTAR Salitre. Además, el aumento de la descomposición de materia orgánica produce CO₂, el cual reacciona con el HCO₃ liberando hidrógeno, acidificando el suelo⁶⁰.

Como resultado de la medición de metales pesados se obtuvo que estos están por debajo del umbral de contaminación en zonas naturales con respecto al Frag. 1 y en áreas industriales para el Frag. 2, los cuales se encontraron en el siguiente orden de concentración de Pb>Cd>Hg. Este análisis indicó que estos elementos están presentes en bajas concentraciones en la zona de estudio, es decir que probablemente no están ocasionando toxicidad, sin embargo, es importante mencionar que existen varios factores que contribuyen a la acumulación de los metales pesados, como por ejemplo, el pH del suelo, que permite mayor movilidad de estos elementos, también, la textura del suelo arcilloso puede contribuir a la adsorción de metales pesados y en mayor cantidad la presencia de materia orgánica, la cual reacciona con estos metales formando complejos organometálicos muy estables como sucede con el Pb, lo cual permite su disponibilidad en el suelo, facilitando su dispersión por parte las poblaciones bacterianas capaces de degradar el elemento⁶⁶. Además, esta acumulación persistente puede llevar a procesos de biomagnificación pasando a la cadena trófica.

Los metales pesados están relacionados con varias actividades antrópicas observadas en la zona de estudio que pueden aumentar su concentración, algunas como el desecho de baterías recargables de Ni/Cd, plásticos, vidrios, latas, residuos de elementos electrónicos y de cómputo, combustión de residuos, los desechos de la PTAR Salitre y de las industrias alrededor del Frag 2, podrían contener catalizadores, estabilizadores y pigmentos que contribuyan a la presencia de estos elementos en el suelo. Con respecto al mercurio, es importante resaltar que, algunos de sus compuestos inorgánicos son bastantes solubles, ya que pueden formar complejos con la materia orgánica y arcilla del suelo, y en consecuencia, pueden aumentar su concentración convirtiendo el suelo en un gran depósito de mercurio antropogénico⁷¹.

De acuerdo con este contexto, se puede indicar que la zona de estudio seleccionada, ubicada en el barrio Santa Cecilia, sector de la PTAR Salitre, en donde anteriormente se encontraba gran parte del humedal El Cortijo se ha transformado considerablemente tanto macroscópicamente a nivel de la cobertura vegetal, el uso del suelo y otros, como microscópicamente con respecto a los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos (Tabla 5).

En ese sentido, con respecto a la diversidad microbiológica en especial la población bacteriana, Escalante (2004)⁹¹ aclara que no todas las bacterias son cultivables por herramientas o métodos convencionales y es necesario usar técnicas moleculares para determinar las especies bacterianas presentes en el suelo, que filogenéticamente pueden ser similares a las bacterias cultivables, pero en un estado fisiológico que los mantiene firme en su comportamiento, teniendo en cuenta esto, es necesario mencionar que algunas bacterias cultivables pueden convertirse en viables, pero no cultivables debido a condiciones ambientales adversas, que pueden modificarse o revertirse a un estado cultivable al restaurar las condiciones favorables de estas, permitiendo que se adapten al medio y se desarrollen en él; Sin embargo, en este estudio a partir de técnicas de cultivo convencionales se pudieron obtener algunos resultados interesantes con relación a la presencia y concentración de microorganismos bacterianos en el suelo. (anexo 3 y 4)

Los resultados obtenidos a través del análisis microbiológico permitieron identificar bacterias pertenecientes a los géneros *Escherichia coli* y *Citrobacter freundii* como microorganismos indicadores de contaminación, ya que se encuentran en el grupo de los coliformes totales.

Este grupo se utiliza como un indicador de contaminación debido a que son bacterias altamente tolerantes y resistentes a diferentes procesos de tratamientos en suelos y aguas que tienen contacto con desechos tóxicos, además, pueden sobrevivir en ambientes hostiles⁷². Con respecto a la bacteria *E. coli* y *Kluyvera cryocrescens*, se utilizan como indicadores de contaminación fecal, ya que se encuentran en el intestino tanto de los humanos como de los animales⁷³, lo cual es clave tener en cuenta debido a que la zona en estudio se encuentra en gran parte en contacto con las aguas residuales domésticas, lo cual contrasta con la cantidad aumentada de UFC obtenidas en los medios de cultivo de para esta población.

En cuanto a los otros microorganismos hallados, *Pseudomonas aeruginosa* y *Citrobacter freundii* (ya mencionado), se encuentran comúnmente en aguas residuales, suelos y en ocasiones, *C. freundii* en el tracto gastrointestinal del humano⁷⁴, esto indica que su presencia está relacionada con la capacidad que tienen para degradar sustancias, en particular, hidrocarburos totales de petróleo (PTH)⁷⁵. Estos contaminantes son una combinación de diferentes compuestos originados por sustancias químicas, como los subproductos de desecho del hogar que llegan al Río de Bogotá, en donde se encuentran el blanqueador, detergentes, pasta dental, shampoo, maquillaje, entre otros. Al mismo tiempo, se encuentran reportes de la capacidad de las *Pseudomonas sp* para tolerar medios contaminados con metales pesados, en donde esta bacteria posee proteínas denominadas metalotioneínas, que se unen al metal permitiendo su bioacumulación⁷⁶. También, la bacteria *Kluyvera sp*, se ha observado en diferentes estudios que tiene resistencia a Pb, Cd, Zn, Cu, Ni, Co y Cr, lo cual es fundamental para tener en cuenta al momento de implementar procesos de biorremediación⁷⁷.

En relación con los indicadores de la actividad microbiana del suelo, Moratto (2005)⁷⁰ Concluye que una alta cantidad, actividad o diversidad de los microorganismos del suelo es señal de su buena calidad. Resaltando que las actividades de estos microorganismos son irremplazables en el flujo de energía y la transformación de nutrientes en el ambiente, pues influyen en la conservación de la estructura del suelo y la biodegradación de contaminantes, y en la degradación de diferentes plaguicidas, derivando de ellos energía y nutrientes para su metabolismo. Con respecto a esto en la búsqueda microbiológica realizada en este estudio, se evidenció crecimiento bacteriano relacionado a géneros como *Azotobacter sp*, *Azospirillum sp*, *Rhizobium sp*, *Pseudomonas spp.*, entre otros, mencionados por Álvarez, (2017)⁶⁷ como importantes, por ser microorganismo funcionales en la transformación de los compuestos orgánicos e inorgánicos y que favorecen la nutrición de las plantas a través de fijación del

nitrógeno, la solubilización del fósforo, la degradación de PTH y favorecer el crecimiento vegetal.

Para el caso del grupo de los fosfato solubilizadores Corrales (2014)⁶⁸ señala que existe gran diversidad de microorganismos con esta capacidad en el ecosistema del suelo, lo cual explica la presencia de distintas morfologías observadas en este estudio, estas se pueden relacionar posiblemente con el género Gram positivo *Bacillus spp.*, mayor representante de los fosfato solubilizadores y, géneros Gram negativos como *Pseudomonas spp.*, *Rhizobium spp.* y *Azotobacter spp.* Asimismo, de hongos saprófitos como *Aspergillus sp.*, *Penicillium sp.*, *Trichoderma sp.* y *Cladosporium sp.*; microorganismos que según Scattareggia (2016)⁶⁹ y Gómez (2017)⁷⁹, representan una importante actividad microbiana siendo capaces de transformar el fósforo en un compuesto soluble mediante la producción de enzimas como fosfatasas, fitasas o ácidos orgánicos, promoviendo de esta manera, una mejor transición del compuesto en el sistema suelo-planta convirtiéndolo en su forma biodisponible, con el fin de aportar grandes beneficios al ecosistema y promover el desarrollo vegetal.

Con respecto a lo anterior, es importante resaltar que el proceso de transformación que ha sufrido el suelo analizado en este estudio y su uso actual, ha dado como resultado la acidificación moderada-extrema del medio, es por esto que Scattareggia (2016)⁶⁹ explica que el pH del suelo afecta la solubilización del fosfato, pues este determina las proporciones de aniones, entendiendo que a mayor acidez mayor es la proporción relativa de la forma monovalente, que junto con la presencia de ciertos cationes dan origen a compuestos insolubles, ya que la solubilidad de los fosfatos dependerá del tipo de cationes que los forman pasando a un estado no asimilable para el desarrollo y mantenimiento equilibrado del ecosistema. A pesar de esto, se logró obtener una buena concentración de UFC/gr de suelo y niveles óptimos de fosfato, lo cual sustenta la idea de una buena calidad en el suelo en esta área pero sobre todo, gran capacidad adaptativa de este grupo funcional.

En cuanto a los microorganismos diazótrofos, se obtuvo un crecimiento similar en ambas zonas para los géneros *Azotobacter sp.* y *Azospirillum sp.* pero un crecimiento significativo en relación con el género *Rhizobium sp.*, se presentó solo en el fragmento 1. Lo anterior se puede entender con base en lo mencionado por Contreras (2007)⁸⁴, este género no necesariamente existe en todo los suelos a pesar de ser habitante natural como heterótrofo,

sin embargo, su existencia libre continuada en los suelos, depende de la presencia de una raíz hospedante que estimula su proliferación, aunque también puede ser saprófito al desarrollarse en ausencia de la planta pero en menor cantidad. Todo lo anterior se relaciona con los resultados obtenidos en el análisis de las muestras de suelo del Frag. 2, una zona expuesta a los efectos de la industria, el pastoreo, la pérdida hídrica y de vegetación biodiversa, lo cuál evidencia el efecto sobre la concentración de cierta población microbiana al intervenir en sus condiciones medioambientales.

Con relación al grupo funcional de fijadores de nitrógeno menciona Pedraza (et al, 2010)⁸⁰ que el ingreso de nitrógeno en las cadenas naturales depende de estas bacterias que cuentan con la capacidad a través de la enzima nitrogenasa de reducir el nitrógeno atmosférico, una fuente ilimitada pero no aprovechable, a amonio un compuesto disponible para los demás organismos del suelo y las plantas. La fijación de nitrógeno es un proceso energéticamente costoso para las bacterias que se pueden encontrar en vida libre o en simbiosis, sobre esto Fernandez (2002)⁸¹ resalta los limitantes de la fijación biológica en suelos con pH ácido, deficiencia o toxicidad de Ca, Mo, Al o P, variaciones de la temperatura y humedad, entre otros; de los cuales el suelo en estudio presenta óptimas condiciones excepto por la acidez encontrada; según Acevedo (2011)⁸² esto puede afectar la fijación del nitrógeno al suelo junto con la intervención en los ecosistemas por el hombre como es el caso de los desmontes, la pérdida hídrica, el sobrepastoreo del ganado y el fuego (actividades anteriormente mencionadas en cada fragmento), que además pueden ocasionar no solo pérdidas de nitrógeno y si no también afectar la fertilidad del suelo⁸³.

Por otro parte, algunos autores ⁸⁵ argumentan como el funcionamiento de las PTAR producen lodos y residuos, que a pesar de aportar nutrientes y otros usos prácticos, pueden sobrecargar el suelo y los cuerpos de agua, generando acumulaciones importantes de nitratos y nitritos, que estimulan procesos de desnitrificación en el suelo y reduce los niveles de nitrógeno, estos procesos pueden ser llevados a cabo por bacterias como *Bacillus sp.* y *Pseudomonas sp.* géneros aislados e identificados en el presente trabajo. Todo lo anterior expone las posibles alteraciones que se presentan en la zona, como los bajos niveles de nitrógeno a pesar de poseer buena concentración de microorganismos y propone a futuro, un seguimiento y búsqueda detallada de la disposición final de los residuos producidos en la planta de tratamiento de aguas residuales del Salitre y su impacto en la zona a nivel microscópico.

Con respecto a los hongos obtenidos en esta investigación Ñustez (2005)⁸⁷ menciona algunos de los géneros encontrados, *Aspergillus sp.*, y *Penicillium sp.*, los cuales presentan una capacidad fosfato solubilizadora importante para el suelo. En cuanto a los hongos filamentosos que se pueden encontrar naturalmente en el ecosistema edáfico, Cañon (2017)⁹⁰, menciona que son altamente adaptables por lo que pueden llegar a presentar diferentes funciones, algunos pueden ser entomopatógenos, micoparásitos, saprófitos o nematófagos. Tal es el caso de *Trichoderma sp.* Es un género ampliamente conocido, y obtenido en este estudio, de fácil adaptación a diferentes condiciones ambientales, lo que permite su extensa distribución, encontrando que algunas especies son inofensivas y otras muy perjudiciales en relación con otros hongos debido a su producción de toxinas y antibióticos.

Es importante resaltar además que algunas variables como el pH pueden estar asociadas a la abundancia de hongos⁸⁸, ya que algunos hongos toleran un amplio rango de pH entre 5-9 sin impedir su desarrollo. En ese sentido Barrios (2018)⁸⁸ menciona como el rápido crecimiento de los hongos saprófitos pueden originar una elevada demanda del N disponible en el suelo. Adicionalmente, Pfenning, 2008.⁸⁶, agrega que las actividades antropogénicas pueden afectar la diversidad y/o cantidad de hongos presentes en el suelo, los cuales juegan un importante papel en el reciclaje de nutrientes o como biocontroladores. Añadiendo que, existen evidencias de que las prácticas agrícolas causan más alteraciones cuantitativas que cualitativas de esta comunidad.

Con base en lo mencionado previamente y teniendo en cuenta los datos cuantitativos obtenidos en el presente trabajo, se evidencio que el suelo analizado no presenta gran abundancia y/o diversidad microbiana, como se esperaba, considerando que hace algunos años esta zona era un humedal y está rodeada de fuentes hídricas, en ese sentido y de acuerdo con los resultados se considera que esto puede ser una posible consecuencia generada por la transformación e impacto de las estructuras ecosistémicas en la zona. Ante esto Pacasa, (2017)⁸⁹ señala que la abundancia y la diversidad de hongos filamentosos en los suelos de un ecosistema, están influenciadas por el tipo de uso del suelo junto con sus propiedades fisicoquímicas más el tipo de vegetación nativa que se presente. Adicionalmente, el mismo autor destaca que los suelos que sufren cambios drásticos pueden tener abundancia pero no diversidad de microorganismos, contrario a lo que sucede en los suelos naturales y de vegetación nativa, donde se encuentra mayor diversidad, en particular de hongos, aunque no se haya evidenciado en el presente trabajo.

12. CONCLUSIONES

El trabajo se fundamentó en el análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de las muestras de suelo (fragmento 1 y 2) obtenidas en las cercanías del sector de la PTAR Salitre en el Barrio Santa Cecilia, los resultados permitieron tener una idea desde otra perspectiva sobre el impacto ocasionado por la contaminación e infraestructuras ubicadas alrededor de la zona, encontrándose en general el déficit de algunos micronutrientes, así como la disminución del crecimiento y desarrollo de la vegetación en la zona.

Se observó un suelo de color marrón rojizo oscuro, arcilloso con poca cantidad de nitrógeno pero con una concentración de fósforo aumentada y un pH entre 4-5, que indica la acidez del suelo, inducido en parte por la mineralización de la materia orgánica presente, factor que conduce a una disminución de ciertos microorganismos en el ecosistema edáfico y a una alteración en la formación de los compuestos del fósforo, los cuales posiblemente no se están aprovechando de manera adecuada por las plantas.

Se lograron aislar e identificar bacterias tales como *Escherichia coli*, *Kluyvera cryocrescens*, pertenecientes al grupo de los coliformes totales y que se encuentran normalmente en los desechos fecales, lo cual es de gran utilidad como indicador de procesos de contaminación observados en la zona en estudio. También, se encontraron las bacterias *Pseudomonas aeruginosa* y *Citrobacter freundii*, que son capaces de metabolizar compuestos como los PTH y metales pesados, sustancias encontradas por debajo del umbral de contaminación. Es fundamental tener en cuenta estos géneros bacterianos, ya que su implementación es esencial en procesos de biorremediación.

Se hallaron microorganismos importantes en los procesos vitales microbianos como los fijadores de nitrógenos y fósforo solubilizadores tales como *Azospirillum sp*, *Rhizobium sp*, altamente resistentes a pesar de estar en contacto con los coliformes y desechos tóxicos generados por la PTAR, es decir, que son capaces de sobrevivir en ambientes hostiles, siendo necesario enfatizar que estos microorganismos son esenciales en la transformación de los compuestos orgánicos e inorgánicos, la nutrición de las plantas y en promover el crecimiento vegetal.

La disminución en la calidad del suelo evidenciada en esta investigación podría asociarse a la pérdida del ecosistema de Humedal El Cortijo antes ubicado en la zona de estudio, esto se fundamenta en que el suelo constituye un elemento clave para la conservación y mantenimiento de estos espacios, por tal razón el adecuado manejo de suelos, y desechos generados por las PTAR y actividades antrópicas resulta fundamental para la protección y conservación de la flora y fauna del país.

13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Hughes J, Cowper-Heays K, Oleson E, Bell R, Stroombergen A. Impacts and implications of climate change on wastewater systems: A New Zealand perspective. *Climate Risk Management* [Internet]. 2021 [cited mar 2021]; Vol 11. Available in: <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2163/science/article/pii/S2212096320300528>
2. Xiu-Heng Wang, Xu Wang, Gjalt Huppes, Reinout Heijungs, Nan-Qi Ren. Environmental implications of increasingly stringent sewage discharge standards in municipal wastewater treatment plants: case study of a cool area of China. *Journal of Cleaner Production* [Internet]. 2015 [cited mar 2021]; Vol 94. Available in: <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2163/science/article/pii/S0959652615001110>.
3. Rodríguez-Eugenio N, McLaughlin M, Pennock D. La contaminación del suelo: una realidad oculta. *FAO* [Internet]. 2019 [citado mar 2021]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/I9183ES/i9183es.pdf>
4. Martínez YP, Balda RR. Visión General Sobre el Proceso de Fitorremediación en Lodos Provenientes de Ptar. *Revista Especializada en Ingeniería de Procesos en Alimentos y Biomateriales* [Internet]. Agosto 2011 [citado mar 2021]; Vol 5. Disponible en: <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/publicaciones-e-investigacion/article/view/597/1288>
5. Sabri NA, van Holst S, Schmitt H, van der Zaan BM, Gerritsen HW, Rijnaarts HHM, et al. Fate of antibiotics and antibiotic resistance genes during conventional and additional treatment technologies in wastewater treatment plants. *Science of The Total Environment* [Internet]. 2020 [cited mar 2021]; Vol 741. Available in: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720337207>
6. Serrano JA, Gonzales LM. Valoración económica de los beneficios ambientales del funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en el municipio de Ubaté - Cundinamarca. [Administrador Ambiental]. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José De Caldas; 2016. Disponible en: <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/4701/SerranoGuerreroJohnnyAndres2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

7. Álvarez-Rogel J, Tercero MC, Arce MI, Delgado MJ, Conesa HM, González-Alcaraz MN. Nitrate removal and potential soil N₂O emissions in eutrophic salt marshes with and without *Phragmites australis*. *Geoderma* [Internet]. 2016 [cited mar 2021]; Vol 282. Available in: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706116303056>
8. Alférez LE, Pimiento NN. Plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR): impacto ambiental esperado e impacto ambiental provocado. *Revista Caribeña de Ciencias Sociales* [Internet]. 2019 [citado mar 2021]. Disponible en: <https://www.eumed.net/rev/caribe/2019/06/tratamiento-aguas-residuales.html>
9. Abdelmoneim ROA, et al. Health hazards related to Soba sewage treatment plant, Sudan. *J Public Health Afr* [Internet]. 2017 [cited mar 2021]; 8(2):610. Available in: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29456823/>
10. EAAB. GUIA CONCEPTUAL de la PTAR Salitre [Internet]. [citado mar 2021]. Disponible en: https://www.acueducto.com.co/wps/html/resources/PTAR/guia_concPTARSalitre.pdf
11. Gonzalez G, Diaz A. Análisis de alternativas para ajustar de “categoría b” a “categoría a” los biosólidos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales el salitre según con lo dispuesto en el decreto 1287 de 2014. [especialista en gerencia ambiental]. Bogotá: Universidad Libre; 2015. Disponible en: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/10675/PROYECTO%20DE%20BIOS%20C3%93LIDOS%20%28TIPO%20B%29%20A%20%28TIPO%20A%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
12. Galeano JP. El uso del suelo en el caso de los humedales [Internet]. 2011 [citado mar 2021]. Disponible en: <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/verbaiuris/article/view/2188>
13. CAR. APROXIMACIÓN AL PROCESO DE DEGRADACIÓN DE SUELOS POR CONTAMINACIÓN [Internet]. 2018 [citado mar 2021]. Disponible en: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5bdc74b6e6c1a.pdf>
14. Doran JW. Soil health and global sustainability: translating science into practice. *Agriculture, Ecosystems & Environment* [Internet]. 2002 [citado mar 2021]; Vol 88. Available in: <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2163/science/article/pii/S0167880901002468>
15. Andreoni V, Cavalca MA, Rao MA, Nocerino G, Bernasconi S, Dell'Amico E, et al. Bacterial communities and enzyme activities of PAHs polluted soils. *Chemosphere* [Internet]. 2004. [cited mar 2021]; 57 (5). Available in: <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2163/science/article/pii/S004565350400462X>
16. Aguirre de Cárcer D, Marta M, Karlson U, Rivilla R. Changes in Bacterial Populations and in Biphenyl Dioxygenase Gene Diversity in a Polychlorinated Biphenyl-Polluted Soil after Introduction of Willow Trees for Rhizoremediation. *ASM* [Internet]. 2007 [cited mar 2021]. Available in: <https://aem.asm.org/content/73/19/6224.full>

17. Shukurov N, Pen-Mouratov S, Steinberger Y, Kersten M. Soil biogeochemical properties of Angren industrial area, Uzbekistan. *Soils and Sediments* [Internet]. 2009; (9): 206–215. Available in: <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2425/article/10.1007/s11368-009-0079-8>
18. Fabiani A, Gamalero E, Castaldini M, Cossa GP, Musso C, Pagliai M, et al. Microbiological polyphasic approach for soil health evaluation in an Italian polluted site. *Science of The Total Environment* [Internet]. 2009 [cited mar 2021]; (407): 4954-4964. Available in: <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2163/science/article/pii/S0048969709004665>
19. Sanchez R, Gómez C, Palacios A, Otero J, Cocoma N, Bejarano MC. Programa nacional de monitoreo y seguimiento de la degradación de suelos y tierras en Colombia [Internet]. [citado mar 2021]. Disponible en: http://www.ideam.gov.co/documents/11769/153422/Adicionalmente+consulte_C2-C-R-E-S%C3%A1nchez%2C+R.pdf/d5a21efa-18e7-486c-b925-80560ae91b3c
20. Moreno V, García JF, Villalba JC. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS HUMEDALES DE BOGOTÁ, D.C. SOGEOCOL [Internet]. 2002 [citado ago 2021]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/338897341_Descripcion_General_de_los_humedales_de_Bogota_DC
21. Van der Hammen T, Stiles F, Rosselli L, Chisacá M, Camargo G, Guillot G, et al. Protocolo de recuperación y rehabilitación ecológica de humedales en centros urbanos. 1 ed. [Internet]. Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá D. C., 2008 [citado ago 2021]. Disponible en: <http://biblioteca.cehum.org/handle/CEHUM2018/1776>
22. Montenegro AM. LOS HUMEDALES DE BOGOTÁ: UN RETO PARA LA GESTIÓN PÚBLICA. [Magíster en Derecho Público para la Gestión Administrativa]. Bogotá: Universidad de los Andes; [Internet], 2013 [citado ago 2021]. Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/12187/u671031.pdf?sequence=1>
23. Garzón NM. Estudio multitemporal para identificar los cambios en la cobertura vegetal del Humedal de Tibabuyes. [Especialista en Recursos Hídricos.]. Bogotá: Universidad Católica de Colombia; [Internet], 2016 [citado ago 2021]. Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/13712/4/ESTUDIO%20MULTITEMPORAL%20PARA%20IDENTIFICAR%20LOS%20CAMBIOS%20EN%20LA%20COBERTURA%20VEGETAL%20DEL%20HUMEDAL%20DE%20TIBABUY.pdf>
24. Cruz D, Motta J, García CA. Estimación de la pérdida de área en los humedales de Bogotá en las últimas cinco décadas debido a la construcción y sus respectivos efectos. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas; [Internet], 2017 [citado ago 2021]. Disponible en: <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/5345/CruzSolanoDianaPaola2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
25. Torres C. Estrategias de recuperación y conservación de la zona de amortiguamiento del humedal Juan Amarillo, intervenida por el “proyecto parque Juan Amarillo”, en área de influencia de los barrios cortijo y ciudadela colsubsidio de la localidad de

- Engativá. [Ingeniero Ambiental]. Bogotá: Universidad del Bosque; [Internet], 2019 [citado ago 2021]. Disponible en: https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/2850/Torres_García_Carolina_2019.pdf?sequence=1
26. Colombia. República de Colombia. decreto 2811 del 18 de diciembre de 1974 Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente [Internet] [citado mar 2021]. Disponible en: https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto_2811_de_1974.pdf
 27. Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. decreto 3100 de 2003 sobre Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos -PSMV, y se adoptan otras determinaciones. [Internet] [citado abril 2021]. Disponible en: <https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/2018-09/Res1433DIC13-2004.pdf>
 28. Colombia. Alcaldía Mayor de Bogotá D. C. Resolución 170 de 2009 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial por la cual se declara en Colombia el año 2009 como año de los suelos y el 17 de junio como Día Nacional de los Suelos y se adoptan medidas para la conservación y protección de los suelos en el territorio nacional [Internet] [citado mar 2021]. Disponible en: <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Normal1.jsp?i=35369>
 29. Colombia. República de Colombia. Decreto 1287 DE 2014 por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. [Internet] [citado abril 2021]. Disponible en: www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=1259502
 30. Colombia. República de Colombia. Decreto 1076 de 2015, Decreto único reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible. [Internet] [citado abril 2021]. Disponible en: https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=78153
 31. Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución 0631 de 2015 Por el cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.[Internet] [citado abril 2021]. Disponible en: https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf
 32. Colombia. Alcaldía Mayor de Bogotá D. C. Resolución 3887 de 2010 Por la cual se aprueba el Plan de Manejo Ambiental del Humedal Juan Amarillo y se adoptan otras determinaciones. Bogotá: La Alcaldía; [Internet], 2010 [citado abril 2021].
 33. Donado R. Plan de gestión para lodos generados en las PTAR-D de los municipios de Cumaral y San Martín de los Llanos en el departamento del Meta. [magíster en gestión ambiental]. Bogotá. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de estudios ambientales y rurales; 2013. Disponible en: <https://repositorio.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/13496/DonadoHoyosRoger2013.pdf?sequence=1>

34. Duan B, Zhang W, Zheng H, Wu C, Zhang Q, Bu Y. Comparison of Health Risk Assessments of Heavy Metals and As in Sewage Sludge from Wastewater Treatment Plants (WWTPs) for Adults and Children in the Urban District of Taiyuan, China. *Int J Environ Res Public Health* [Internet]. 2017 [cited mar 2021]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5664695/>
35. EAAB. Guía conceptual sobre la PTAR Salitre [Internet]. [citado mar 2021]. Disponible en: https://www.acueducto.com.co/wps/html/resources/PTAR/guia_concPTARSalitre.pdf
36. Parra Y, Balda RR. Visión General Sobre el Proceso de Fitorremediación en Lodos Provenientes de Ptár. *Publ. investig* [Internet]. 2011 [citado mar 2021]; 5(1), 121-130. Disponible en: <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/publicaciones-e-investigacion/article/view/597>
37. CAR. Aproximación al proceso de degradación de suelos por contaminación [Internet]. [citado mar 2021]. Disponible en: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5bdc74b6e6c1a.pdf>
38. Zamora F, Rodríguez N, Torres D, Yendis H. Efecto del riego con aguas residuales sobre propiedades químicas de suelos de la planicie de Coro, Estado Falcón. *Bioagro* [Internet]. 2008 [citado mar 2021] Vol 20. Disponible en: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612008000300006
39. Natasha M, Sardar A, Anwar H, Khalid S, Sajid H, Haidar S, et al. Effect of co-application of wastewater and freshwater on the physiological properties and trace element content in *Raphanus sativus*: soil contamination and human health. *Environ Geochem Health* [Internet]. 2020 [cited mar 2021]. Available in: <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2162/10.1007/s10653-020-00635-x>
40. Raymond A. Wuana, Felix E. Okieimen. Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. *International Scholarly Research Notices* [Internet]. 2011 [cited mar 2021]. Available in: <https://www.hindawi.com/journals/isrn/2011/402647/>
41. Ramirez E, Ceron E. Actividad microbiana en suelos y sedimentos en el sistema Córdoba Juan Amarillo, Bogotá D.C. *Rev. Acad. Colomb. Cienc* [Internet]. 2011 [citado mar 2021]. 35 (136): 349-361. Disponible en: http://www.acefyn.com/revista/Vol_35/136/349-361.pdf
42. Garcia Y, Ramirez W, Sanchez S. Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes* [Internet]. 2012 [citado mar 2021] 35(2), 125-138. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942012000200001#:~:text=La%20estructura%2C%20la%20densidad%20aparente,como%20indicadores%20de%20su%20calidad
43. Vallejo-Quintero E. importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos mediante el componente microbiano: experiencias en sistemas silvopastoriles. *Colombia Forestal* [Internet]. 2013 [citado mar 2021] 16(1): 83 – 99. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/cofo/v16n1/v16n1a06.pdf>

44. Bermúdez A. Restauración de suelos degradados mediante la aplicación de biosólido producido en la planta de tratamiento de aguas residuales el Salitre en Bogotá D. C. [Especialista en Gerencia Ambiental]. Bogotá: Universidad Libre; 2013. Disponible en: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/10627/Restauraci%C3%B3n%20de%20suelos%20degradados%20%20mediante%20la%20aplicaci%C3%B3n%20de%20bios%C3%B3lido%20producido%20en%20la%20planta%20de%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

45. Arvelaez K, Parra M. Análisis de impacto ambiental y social de la planta de tratamiento de aguas residuales barra da tijuca en brasil como lecciones aprendidas para la ciudad de Bogota D.C. [Ingenieras Civiles]. Bogotá: Universidad Católica de Colombia; 2017. Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14535/1/An%C3%A1lisis%20de%20impacto%20ambiental%20y%20social%20de%20la%20planta%20de%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales%20Barra%20Da%20T.pdf>

46. Zhang X, Hu W, Jin X, et al. Diversity of soil nitrogen-fixing bacteria in the rhizosphere and non-rhizosphere soils of Ebinur Lake Wetland. Arch Microbiol [Internet]. 2021 [cited Aug 2021]. 203, 3919–3932. Available in: <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2162/10.1007/s00203-021-02363-x>

47. Ghio Silvina. Prospección y caracterización de bacterias celulolíticas y hemicelulolíticas. [Doctor en Química Biológica]. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires; 2018. Disponible en: https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis_n6385_Ghio.pdf

48. Gonzáles Y. Los actinomicetos: una visión como promotores de crecimiento vegetal. [microbióloga agrícola y veterinaria]. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana; 2010. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/8665/tesis618.pdf;sequence=1>

49. Quist W, Gort G, Mooijman P, Brus DJ, Elsen S, Kostenko O, et al. Spatial distribution of soil nematodes relates to soil organic matter and life strategy. Soil Biology and Biochemistry [Internet]. 2019 [cited Aug 2021]. Vol 136. Available in: <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2163/science/article/pii/S0038071719302068>

50. Briar SS, Grewal PS, Somasekhar N, Stinner D, Miller SA. Soil nematode community, organic matter, microbial biomass and nitrogen dynamics in field plots transitioning from conventional to organic management, Applied Soil Ecology, [Internet]. 2019 [cited Aug 2021]. 37 (3): 256-266. Available in: <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2163/science/article/pii/S0929139307000893>

51. Abril A. ¿Son los microorganismos edáficos buenos indicadores de impacto productivo en los ecosistemas?. Ecología Austral [Internet]. 2003 [citado Ago 2021]. 13:195-204. Disponible en: https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/ecologiaaustral/ecologiaaustral_v013_n02_p195.pdf

52. Delgadillo N. Descripción de comunidades microbianas cultivables en las raíces de especies seleccionadas en el estudio de humedales construidos en el Páramo Chingaza. [Internet]. Uniandes; 2015 [citado Ene 2022]. Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/17649/u713982.pdf?sequence=1>
53. Avellaneda L M, Torres E. Grupos funcionales de microorganismos del suelo asociados a cultivo de papa, ganadería y páramo del Parque Nacional Natural de Los Nevados. Biota Colombiana [Internet]. 2013 [citado Ene 2022]. 16 (1). Disponible en: http://repository.humboldt.org.co/bitstream/handle/20.500.11761/9429/Biota_16_1_2015_baja_2_p80-89.pdf?sequence=1&isAllowed=y
54. Beltrán ME, Rocha ZE, Bernal AA, Pita LA. Microorganismos funcionales en suelos con y sin revegetalización en el municipio de Villa de Leyva, Boyacá. Colombia Forestal [Internet]. 2017 [citado Ene 2022]. 20(2), 158-170. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/cofo/v20n2/v20n2a05.pdf>
55. Estrada de Luis IB, Gil MV, Aller A, Morán A. Influencia de la temperatura en la evolución de la población de aerobios totales y de microorganismos patógenos en un suelo tratado con lodo de depuradora urbana. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo [Internet]. 2003 [citado Ene 2022] ;(6). Disponible en: https://abe.ufl.edu/faculty/carpena/files/pdf/zona_no_saturada/estudios_de_la_zona_v6/p361-366.pdf
56. Garzón AF, Perdomo LP. Grupos funcionales de microorganismos (fijadores de nitrógeno, solubilizadores de fosfato y celulolíticos) en suelos de agroecosistemas cafeteros (ecológicos y convencionales) en Anolaima, Cundinamarca. [Ingeniería Ambiental]. Bogotá: Universidad Libre; 2015. Disponible en: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/11255/Proyecto%20Final%20Andrea%20Fernandez%20y%20Laura%20Perdomo%20Enero%202015.pdf?sequence=1>
57. Hinestroza JC, Caicedo H. Abundancia de grupos funcionales de microorganismos del suelo bajo cuatro sistemas de manejo agro ecosistémico del municipio de Palmira (Valle del Cauca). [Ingeniero Ambiental]. Bogotá: Universidad Abierta y a Distancia – UNAD; 2018. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/18835/10388556.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
58. Lara C, Esquivel LM, Negrete JL. Bacterias nativas solubilizadores de fosfatos para incrementar los cultivos en el departamento de Córdoba-Colombia. Rev.Bio.Agro [Internet]. 2011 [citado Ene 2022]; 9(2): 114-120. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612011000200013&lng=en.
59. ISSUU-Textura del suelo [Internet]. Bogotá, CO: jeallaca 2017. [citado Ene 2022]. Disponible en: https://issuu.com/jeallaca/docs/textura_del_suelo.pptx
60. Intagri S.C [Internet]. México: INTAGRI; 1998. [citado Ene 2022]. Disponible en: <https://www.intagri.com/articulos/suelos/manejo-y-correccion-de-acidez-de-suelo#:~:te>

xt=Descomposici%C3%B3n%20de%20la%20materia%20org%C3%A1nica,hidr%C3%B3geno%20que%20acidifica%20el%20suelo.

61. Arbeláez EE, Suárez EA, Gindri C. Manual de Prácticas de Laboratorio de Tratamiento y Gestión del Suelo. Primera Edición [Internet]. Barranquilla: Corporación Universidad de la Costa; 2020 [citado Ene 2022]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/348443942_Manual_de_Practicas_de_Laboratorio_de_Tratamiento_y_Gestion_del_Suelo
62. Ciancaglini N. R- 001- Guía para la determinación de textura de suelos por método organoléptico [Internet]. [citado Ene 2022]. Disponible en: [http://www.prosap.gov.ar/Docs/INSTRUCTIVO%20\(R-001\)-%20Gu%C3%ADa%20para%20la%20determinaci%C3%B3n%20de%20textura%20de%20suelos%20por%20m%C3%A9todo%20organol%C3%A9ptico.pdf](http://www.prosap.gov.ar/Docs/INSTRUCTIVO%20(R-001)-%20Gu%C3%ADa%20para%20la%20determinaci%C3%B3n%20de%20textura%20de%20suelos%20por%20m%C3%A9todo%20organol%C3%A9ptico.pdf)
63. Martínez EA, Torregroza AC, Crissien TJ, Marrugo JL, González LC. Evaluation of contaminants in agricultural soils in an Irrigation District in Colombia. Heliyon [Internet]. 2019 [cited Feb 2022]; 5(8). Available in: <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2163/science/article/pii/S2405844019358773>
64. ABC Geotechnical Consulting [Internet]. Chile. [citado Feb 2022]. Disponible en: <https://geotecniamecnicasuelosabc.com/humedad-suelos/>
65. Agrolab. Guía de referencia para la interpretación y análisis de suelos AGROLAB [Internet]. [citado Feb 2022]. Disponible en: http://www.agrolab.com.mx/sitev002/sitev001/assets/interpretacion_fertsuel.pdf
66. Galán E, Romero A. Conferencia Contaminación de Suelos por Metales Pesados. Macla [Internet]. 2008 [citado Feb 2022]; 48-60.
67. Álvarez MM, Blandón LJ, Ceballos V, Mejía M, Buriticá HM. Aislamiento de microorganismos en diferentes ambientes (Suelo, Agua y Aire). Repositorio Unilibre [Internet]. [citado Feb 2022]; (6): 17-26. Disponible en: <https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/17596>
68. Corrales LC, Sánchez LC, Arévalo ZY, Moreno VB. Bacillus: género bacteriano que demuestra ser un importante solubilizador de fosfato. Nova [Internet]. 2014 [citado el 27 de marzo de 2022]; 12(22): 165-178. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-24702014000200006
69. Scattareggia JP. Aislamiento y selección de Bacterias Solubilizadoras de Fósforo de un suelo cultivado con tomate para industria (*Solanum lycopersicum* L.). [Ingeniería en Recursos Naturales Renovables]. Argentina: Facultad de Ciencias Agrarias Universidad Nacional de Cuyo; 2016. Disponible en: https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/8408/tesis-irnr-scattareggia-juan-pablo-2016.pdf

70. Moratto C, Martínez LJ, Valencia H, Sánchez J. Efecto del uso del suelo sobre hongos solubilizadores de fosfato y bacterias diazotróficas en el páramo de Guerrero (Cundinamarca). *Agronomía Colombiana* [Internet]. 2005 [citado Feb 2022]; 23(2): 299-309. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/1803/180316955015.pdf>
71. Gaona X. El mercurio como contaminante global. [Doctor en Química]. España: Universidad Autónoma de Barcelona; 2004. Disponible en: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/3174/xgm1de1.pdf>
72. García MI. Tratamiento de lodos residuales procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales mediante procesos electroquímicos para la disminución de la concentración de coliformes fecales y totales. [Ingeniera Ambiental]. Ecuador: Universidad Politecnica Salesiana; 2016. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/12044/1/UPS-CT005866.pdf>
73. Martínez A , Garza U, Sampedro ML, González J, Nava G, Toribio J. Patotipos y resistencia a antibióticos de *Escherichia coli* en agua residual. *Rev. Int. Contam. Ambie* [Internet]. 2020. [citado Feb 2022]; 36 (4) 957-966. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S018849992020000400957&script=sci_arttext_plus&tlng=es
74. Pérez IM. Identificación de coliformes en el canal de aguas lluvias de la Universidad Distrital, Sede Vivero. *Boletín Semillas Ambientales* [Internet]. 2020 [citado Feb 2022]; 14(1):52– 74.
75. Vásquez MC, Guerrero JT , Quintero AP. Biorremediación de lodos contaminados con aceites lubricantes usados. *Rev Colomb. Biotecnol* [Internet]. 2010 [citado Feb 2022]; 12(1): 141-157. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/biote/v12n1/v12n1a14.pdf>
76. Bedoya JM, Castaño G, Ochoa S. Tolerancia al plomo de aislamientos nativos de *Pseudomonas* spp. de aguas residuales del Valle de Aburrá. *Rev. Colomb. biotecnol* [Internet]. 2019 [citado el 27 de marzo de 2022]; 21(1): 135-143. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-34752019000100135
77. Gómez A. Evaluación de la actividad y la diversidad bacteriana con potencial biorremediador asociada a diferentes profundidades en el suelo del morro de Moravia mediante análisis de secuencias del Gen 16s rDNA. [Maestría en Biotecnología]. Medellín: Universidad Nacional de Colombia; 2011. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/7105/71773008.2011.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
78. J III. *Kluyvera*. En el Manual de sistemática de arqueas y bacterias de Bergey [Internet]. 2015 [citado Feb 2022]. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/9781118960608.gbm01151>
79. Gómez LM. Aislamiento de bacterias solubilizadoras de fosfato nativas de la ciénaga de Mallorquín en el Departamento del Atlántico-Colombia. Repositorio Unilibre

- [Internet]. [citado Feb 2022]; (6): 21-24. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10901/17616>
80. Pedraza R, Teixeira K, Scavino AF, Salamone IG, Baca B, Azcón R, et al. Microorganismos Que Mejoran El Crecimiento De Las Plantas Y La Calidad De Los Suelos. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria* [Internet]. 2010 [citado Feb 2022]; 11(2):155-64. Disponible en: <http://revistacta.agrosavia.co/index.php/revista/article/view/206>
 81. Fernández M, Nuria de Maria, Felipe MR. Fijación biológica de nitrógeno: factores limitantes. *Ciencia y Medio Ambiente* [Internet]. 2002 [citado Feb 2022]. Disponible en: <https://digital.csic.es/bitstream/10261/128283/1/Fijaci%C3%B3n%20Biol%C3%B3gica%20MC%20F%20Pascual%29.pdf>
 82. Cristóbal D, Álvarez ME, Hernández E, Améndola-Massiotti R. Concentración de nitrógeno en suelo por efecto de manejo orgánico y convencional. *Terra Latinoamericana* [Internet]. 2011 [citado Feb 2022]; 29(3), 325-332. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792011000300325
 83. Hernán CM, Castellanos AE. Mineralización de nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas. *Terra Latinoamericana*, [Internet]. 2011 [citado Feb 2022]; 29(3), 343-356. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792011000300343
 84. Contreras CX, Iriarte JL, Muños AP. Aislamiento y caracterización bioquímica, fisiológica y morfológica de géneros *Rhizobium* sp. y *Bradyrhizobium* sp. asociados a la leguminosa *cajanus cajan* en parcelas agrícolas del Municipio de Sampués, Departamento de Sucre. [Biólogo con Énfasis en Biotecnología]. Sucre: Universidad de Sucre; 2007. Disponible en: <https://repositorio.unisucre.edu.co/bitstream/handle/001/72/633.3072C764.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
 85. Sepúlveda A, González E, Inostroza C. Remediación de la contaminación por nitratos en el suelo: antecedentes generales y pertinencia en zona sur de Chile. *Gestión Ambiental* [Internet]. 2011 [citado Feb 2022]; 21. 13-32. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/280579834_
 86. Ludwig H, Pfenning P, Magalhães de Abreu L. 2008. Hongos del suelo saprófitos y patógenos de plantas. Cap. 8 [Internet]. [citado Feb 2022]. Disponible en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/667/cap8.pdf>
 87. Núñez CE, Acevedo JC. Evaluación del uso de *Penicillium janthinellum* Biourge sobre la eficiencia de la fertilización fosfórica en el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L. var. Diacol Capiro). *Agronomía Colombiana* [Internet]. 2005 [citado Feb 2022]; 23(2): 290-298. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/agc/v23n2/v23n2a14.pdf>

88. Barrios MB, Sandoval MC. Caracterización de hongos presentes en suelos con usos contrastantes. *Revista de Divulgación Técnica Agropecuaria, Agroindustrial y Ambiental* [Internet]. 2018 [citado Feb 2022]; 5(1): 3-9. Disponible en: <http://revistafcaunz.gramaweb.com.ar/wp-content/uploads/2018/03/Barrios-y-Sandoval.pdf>

89. Pacasa-Quisbert Fernando, Loza-Murguía Manuel Gregorio, Bonifacio-Flores Alejandro, VINO-NINA Lourdes, Serrano-Canaviri Teófilo. Comunidad de hongos filamentosos en suelos del Agroecosistema de Kiphakiphani, Comunidad Choquenaira-Viacha. *J. Selva Andina Res. Soc.* [Internet]. 2017 [citado mar 2022]; 8(1): 2-25. Disponible en: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2072-92942017000100002

90. Cañón D, Sanabria SC. Evaluación de la acción de los hongos *paecilomyces lilacinus*, *trichoderma harzianum* y *lecanicillium lecanii* sobre el nematodo *globodera pallida* stone (behrens) en plantas de papa variedad criolla galeras. [Internet]. 2017 [citado mar 2022]. Disponible en: <https://repository.udca.edu.co/handle/11158/764>

91. Escalante Lozada, Adelfo, Gosset Lagarda, Guillermo, Martínez Jiménez, Alfredo, Bolívar Zapata, Francisco, *Diversidad bacteriana del suelo: métodos de estudio no dependientes del cultivo microbiano e implicaciones biotecnológicas.* *Agrociencia* [Internet]. 2004;38(6):583-592. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30238602>

ANEXO 1.
TABLAS DE RESULTADOS ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

1.1 Reporte de UFC del medio de cultivo Agar Chapman TTC (modificado con Maltosa y Cristal violeta) para aislamiento de coliformes y *E coli*.

| MUESTRAS | | Diluciones sembradas | Réplica 1 | Réplica 2 | Réplica 3 |
|--------------------|------------------|----------------------|---------------|---------------|---------------|
| Fragmento 1 | Muestra 1 | Dil 10e4 | >1 x 10e4 UFC | >1 x 10e4 UFC | >1 x 10e4 UFC |
| | | Dil 10e5 | >1 x 10e5 UFC | >1 x 10e5 UFC | >1 x 10e5 UFC |
| | Muestra 2 | Dil 10e4 | >1 x 10e4 UFC | >1 x 10e4 UFC | >1 x 10e4 UFC |
| | | Dil 10e5 | >1 x 10e5 UFC | >1 x 10e5 UFC | >1 x 10e5 UFC |
| | Muestra 3 | Dil 10e4 | >1 x 10e4 UFC | >1 x 10e4 UFC | >1 x 10e4 UFC |
| | | Dil 10e5 | >1 x 10e5 UFC | >1 x 10e5 UFC | >1 x 10e5 UFC |
| Fragmento 2 | Muestra 1 | Dil 10e4 | >1 x 10e4 UFC | >1 x 10e4 UFC | >1 x 10e4 UFC |
| | | Dil 10e5 | >1 x 10e5 UFC | >1 x 10e5 UFC | >1 x 10e5 UFC |
| | Muestra 2 | Dil 10e4 | >1 x 10e4 UFC | >1 x 10e4 UFC | >1 x 10e4 UFC |
| | | Dil 10e5 | >1 x 10e5 UFC | >1 x 10e5 UFC | >1 x 10e5 UFC |
| | Muestra 3 | Dil 10e4 | >1 x 10e4 UFC | >1 x 10e4 UFC | >1 x 10e4 UFC |
| | | Dil 10e5 | >1 x 10e5 UFC | >1 x 10e5 UFC | >1 x 10e5 UFC |

Elaboración propia, 2021

1.2 Reporte UFC Agar YMA para identificación de *Azospirillum sp.*

| <i>Colonias sospechosas del género Azospirillum sp en Medio YMA</i> | | | | | |
|---|-----------|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| MUESTRAS | | Diluciones sembradas | Réplica 1 | Réplica 2 | Réplica 3 |
| Fragmento 1 | Muestra 1 | Dil 10e3 | 26 UFC | 29 UFC | 27 UFC |
| | | Dil 10e4 | 11 UFC | 7 UFC | 7 UFC |
| | | Dil 10e5 | - | - | 1 UFC |
| | Muestra 2 | Dil 10e3 | - | - | - |
| | | Dil 10e4 | 4 UFC | 10 UFC | 3 UFC |
| | | Dil 10e5 | 1 UFC | - | 2 UFC |
| | Muestra 3 | Dil 10e3 | 23 UFC | 12 UFC | 17 UFC |
| | | Dil 10e4 | 1 UFC | 2 UFC | 7 UFC |
| | | Dil 10e5 | 1 UFC | 2 UFC | - |
| Fragmento 2 | Muestra 1 | Dil 10e3 | 2 UFC | - | 1 UFC |
| | | Dil 10e4 | - | - | - |
| | | Dil 10e5 | - | - | - |
| | Muestra 2 | Dil 10e3 | - | 1 UFC | 2 UFC |
| | | Dil 10e4 | - | - | - |
| | | Dil 10e5 | - | - | - |
| | Muestra 3 | Dil 10e3 | - | - | - |
| | | Dil 10e4 | - | - | - |
| | | Dil 10e5 | - | - | - |

Elaboración propia, 2021

1.3 . Reporte de UFC del medio de cultivo Agar YMA para identificación de *Rhizobium sp.*

| Colonias sospechosas del género <i>Rhizobium sp</i> en Medio YMA | | | | | |
|--|-----------|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| MUESTRAS | | Diluciones sembradas | Réplica 1 | Réplica 2 | Réplica 3 |
| Fragmento 1 | Muestra 1 | Dil 10e3 | 4 UFC | 7 UFC | 3 UFC |
| | | Dil 10e4 | - | 4 UFC | - |
| | | Dil 10e5 | - | 1 UFC | - |
| | Muestra 2 | Dil 10e3 | - | - | - |
| | | Dil 10e4 | 2 UFC | 3UFC | - |
| | | Dil 10e5 | - | - | - |
| | Muestra 3 | Dil 10e3 | 7 UFC | 10 UFC | 7 UFC |
| | | Dil 10e4 | 5UFC | - | 7 UFC |
| | | Dil 10e5 | - | - | - |
| Fragmento 2 | Muestra 1 | Dil 10e3 | - | - | 1 UFC |
| | | Dil 10e4 | 2 UFC | - | - |
| | | Dil 10e5 | - | - | - |
| | Muestra 2 | Dil 10e3 | - | - | - |
| | | Dil 10e4 | - | - | - |
| | | Dil 10e5 | - | - | - |
| | Muestra 3 | Dil 10e3 | - | - | - |
| | | Dil 10e4 | - | - | - |
| | | Dil 10e5 | - | - | - |

Elaboración propia. 2021

1.4. Reporte de porcentaje de crecimiento del género *Azotobacter sp* por la técnica de gránulos de Ashby.

| Colonias sospechosas del género <i>Azotobacter sp</i> en Gránulos de Ashby | | | | |
|---|------------------|------------------|------------------|------------------|
| MUESTRAS | | Réplica 1 | Réplica 2 | Réplica 3 |
| Fragmento 1 | Muestra 1 | 24% | 76% | 16% |
| | Muestra 2 | 40% | 56% | 40% |
| | Muestra 3 | 80% | 52% | 60% |
| Fragmento 2 | Muestra 1 | 40% | 40% | 36% |
| | Muestra 2 | 44% | 40% | 48% |
| | Muestra 3 | 56% | 60% | 60% |

Elaboración propia, 2021

1.5 Reporte UFC de fosfato solubilizadores obtenidos en el medio de cultivo Agar SMRS.

| Aislamiento de fosfato solubilizadores en Medio SMRS | | | | | |
|---|------------------|-----------------------------|--------------------|------------------|---------------------|
| MUESTRAS | | Diluciones sembradas | Réplica 1 | Réplica 2 | Réplica 3 |
| Fragmento 1 | Muestra 1 | Dil 10e2 | - | - | 3 UFC |
| | | Dil 10e3 | - | - | - |
| | | Dil 10e4 | - | - | - |
| | Muestra 2 | Dil 10e2 | - | - | - |
| | | Dil 10e3 | 25 UFC | 54 UFC | 290 UFC |
| | | Dil 10e4 | 71 UFC | 35 UFC | 16 UFC |
| | Muestra 3 | Dil 10e2 | 16 UFC - 1Hongo | - | - |
| | | Dil 10e3 | 39 UFC | 43 UFC | 90 UFC |
| | | Dil 10e4 | 5 UFC | 2 UFC | 21 UFC |
| Fragmento 2 | Muestra 1 | Dil 10e2 | 8 UFC | 21 UFC | - |
| | | Dil 10e3 | 76 UFC | 82 UFC | 25 UFC |
| | | Dil 10e4 | 59 UFC | 77 UFC | 20 UFC |
| | Muestra 2 | Dil 10e2 | 64 UFC | - | - |
| | | Dil 10e3 | 29 UFC | 22 UFC | 42 UFC |
| | | Dil 10e4 | 3 UFC | 113 UFC | 3 UFC |
| | Muestra 3 | Dil 10e2 | 48 UFC | 154 UFC | 111 UFC |
| | | Dil 10e3 | 86 UFC | 46 UFC | 39 UFC - 1 Hongo |
| | | Dil 10e4 | 2 UFC | 41 UFC | 2 UFC |

Elaboración propia, 2021

1.6 Reporte de microorganismos obtenidos en Agar RB.

| Aislamiento de hongos filamentosos en Medio RB | | | | | | |
|--|-------------|----------------------|---|---|---|--|
| MUESTRAS | | Diluciones sembradas | Réplica 1 | Réplica 2 | Réplica 3 | |
| Fragmento 1 | Muestra 1 | Dil 10e2 | Presencia de Levaduras | Presencia de Levaduras | Presencia de Levaduras 1 <i>Mucor sp</i> | |
| | | Dil 10e3 | - | - | - | |
| | | Dil 10e4 | - | 9 <i>Trichoderma sp</i> | - | |
| | Muestra 2 | Dil 10e2 | 9 <i>Trichoderma sp</i> | 5 <i>Tichoderma sp</i> 14 H. <i>filamentosos</i> | 6 <i>Tichoderma sp</i> 7 H. <i>filamentosos</i> | |
| | | Dil 10e3 | 4 <i>Trichoderma sp</i> | 2 <i>Penicillium sp</i> 1 <i>Mucor sp</i> 39 H. <i>filamentosos</i> | 6 <i>Mucor sp</i> 12 <i>Penicillium sp</i> 5 <i>Tichoderma sp</i> | |
| | | Dil 10e4 | 2 <i>Penicillium sp</i> 1 <i>Mucor sp</i> | 1 H. <i>filamentoso</i> | 1 <i>Tichoderma sp</i> 1 <i>Pythium sp</i> 2 H. <i>filamentosos</i> | |
| | Muestra 3 | Dil 10e2 | 5 <i>Trichoderma sp</i> 15 H. <i>filamentosos</i> | 2 <i>Mucor sp</i> 1 <i>Tichoderma sp</i> 20 H. <i>filamentosos</i> | 1 <i>Mucor sp</i> 4 <i>Penicillium sp</i> 3 <i>Trichoderma sp</i> 16 H. <i>filamentosos</i> | |
| | | Dil 10e3 | 37 <i>Penicillium sp</i> | 2 <i>Fusarium sp</i> 2 <i>Mucor sp</i> | 14 <i>Penicillium sp</i> 4 H. <i>filamentosos</i> | |
| | | Dil 10e4 | - | 1 H. <i>filamentoso</i> | 1 <i>Alternaria sp</i> 1 <i>Penicillium sp</i> | |
| | Fragmento 2 | Muestra 1 | Dil 10e2 | 1 <i>Trichoderma sp</i> 3 <i>Mucor sp</i> 1 <i>Fusarium sp</i> 4 <i>Penicillium sp</i> 18 H. <i>filamentosos</i> | 2 <i>Pythium sp</i> 2 <i>Mucor sp</i> 3 <i>Fusarium sp</i> 5 <i>Penicillium sp</i> 27 H. <i>filamentosos</i> | 4 <i>Trichoderma sp</i> 4 <i>Paecilomyces sp</i> 14 H. <i>filamentosos</i> |
| | | | Dil 10e3 | 4 <i>Mucor sp</i> | 1 <i>Penicillium</i> | 2 <i>Penicillium</i> |

| | | | | | |
|--|------------------|----------|--|---|---|
| | | | 2 <i>Fusarium sp</i> 2 <i>Penicillium sp</i> 5 H. <i>filamentosos</i> | <i>sp</i> 2 <i>Pythium sp</i> 12 H. <i>filamentosos</i> | <i>sp</i> 1 <i>Mucor sp</i> 6 H. <i>filamentosos</i> |
| | | Dil 10e4 | 1 <i>H. filamentoso</i> | 1 <i>H. filamentoso</i> | 2 <i>H. filamentosos</i> |
| | Muestra 2 | Dil 10e2 | 2 <i>Aspergillus sp</i> 4 <i>Mucor sp</i> 26 H. <i>filamentosos</i> | 6 <i>Aspergillus sp</i> 18 <i>Mucor sp</i> 10 <i>Penicillium sp</i> | 30 <i>Mucor sp</i> 3 <i>Penicillium sp</i> |
| | | Dil 10e3 | 3 <i>Penicillium sp</i> 14 H. <i>filamentosos</i> | 2 <i>Aspergillus sp</i> 1 <i>Penicillium sp</i> 20 H. <i>filamentosos</i> | 2 <i>Mucor sp</i> 3 <i>Penicillium sp</i> 17 H. <i>filamentosos</i> |
| | | Dil 10e4 | 1 <i>H. filamentosos</i> (<i>Pythium sp</i>) | - | 1 <i>H. filamentoso</i> |
| | Muestra 3 | Dil 10e2 | 1 <i>Pythium sp</i> 1 <i>Mucor sp</i> 8 <i>Aspergillus</i> 4 <i>Penicillium sp</i> 1 <i>Trichoderma sp</i> 10 H. <i>filamentosos</i> | 4 <i>Paecilomyces sp</i> 2 <i>Mucor sp</i> 5 <i>Aspergillus</i> 5 <i>Penicillium sp</i> 12 H. <i>filamentosos</i> | 1 <i>Pythium sp</i> 2 <i>Penicillium sp</i> 2 <i>Trichoderma sp</i> 15 H. <i>filamentosos</i> |
| | | Dil 10e3 | 1 <i>H. filamentoso</i> | - | 1 <i>H. filamentoso</i> |
| | | Dil 10e4 | 1 <i>H. filamentoso</i> | 1 <i>Pythium sp</i> | 1 <i>Trichoderma sp</i> |

Elaboración propia. 2021

1.7 Reporte del número de hongos obtenidos en el medio de cultivo Agar PDA.

| Aislamiento de hongos en Medio PDA | | | | | |
|------------------------------------|-----------|----------------------|---|--|--|
| MUESTRAS | | Diluciones sembradas | Réplica 1 | Réplica 2 | Réplica 3 |
| Fragmento 1 | Muestra 1 | Dil 10e2 | - | - | 12 <i>Penicillium sp</i> |
| | | Dil 10e3 | - | - | - |
| | | Dil 10e4 | - | - | - |
| | Muestra 2 | Dil 10e2 | 2 <i>Penicillium sp</i> 3 H. ambientales | 2 <i>Penicillium sp</i> 2 <i>Mucor sp</i> 1 <i>Paecilomyces sp</i> | 2 <i>Fusarium sp</i> 2 <i>Penicillium sp</i> 1 <i>Mucor sp</i> |
| | | Dil 10e3 | 1 <i>Penicillium sp</i> | - | - |
| | | Dil 10e4 | - | - | - |
| | Muestra 3 | Dil 10e2 | 1 <i>Mucor sp</i> | 3 <i>Aspergillus sp</i> | 4 <i>Aspergillus sp</i> |
| | | Dil 10e3 | - | 1 <i>Penicillium sp</i> | - |
| | | Dil 10e4 | - | - | - |
| Fragmento 2 | Muestra 1 | Dil 10e2 | 7 <i>Penicillium sp</i> | 1 <i>Penicillium sp</i> 2 <i>Pythium sp</i> 6 <i>Paecilomyces sp</i> | 3 <i>Trichoderma sp</i> |
| | | Dil 10e3 | 1 <i>Mucor sp</i> | 1 <i>Paecilomyces sp</i> | 1 <i>Paecilomyces sp</i> |
| | | Dil 10e4 | - | - | 1 <i>Paecilomyces sp</i> |
| | Muestra 2 | Dil 10e2 | 8 <i>Cladosporium sp</i> | 2 <i>Mucor sp</i> | - |
| | | Dil 10e3 | - | - | - |
| | | Dil 10e4 | - | - | - |
| | Muestra 3 | Dil 10e2 | 1 <i>Mucor sp</i> | 4 <i>Aspergillus sp</i> | - |
| | | Dil 10e3 | - | - | - |
| | | Dil 10e4 | - | - | - |

Elaboración propia. 2021

ANEXO 2

RESULTADOS PRUEBAS BIOQUÍMICAS

2.1 Resultados pruebas bioquímicas PANEL BBL CRYSTAL para Gram Negativos.

| P | F1 | | | | F2 | P | F1 | | | | F2 |
|-----|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|
| | Mx-1 | Mx-2 | Mx-3 | Mx-4 | Mx-5 | | Mx-1 | Mx-2 | Mx-3 | Mx-4 | Mx-5 |
| ARA | + | + | + | - | - | AAR | + | + | + | - | - |
| MNS | + | + | + | - | + | PHC | - | - | - | + | - |
| SUC | - | - | + | - | - | GLR | + | - | - | - | - |
| MEL | + | + | + | - | - | NAG | - | - | - | - | - |
| RHA | + | + | + | - | - | GGL | - | - | - | + | + |
| SOR | + | + | + | - | - | ESC | - | - | + | - | - |
| MNT | + | + | + | + | - | PHE | - | + | + | - | - |
| ADO | - | - | - | - | - | URE | - | - | - | + | + |
| GAL | + | + | + | + | + | GLY | - | - | - | + | + |
| INO | - | - | - | - | - | CIT | - | - | + | + | + |
| PHO | + | + | - | - | + | MLO | - | + | - | + | + |
| BGL | - | - | - | - | - | TTC | + | - | + | + | + |
| NPG | + | + | + | - | - | ARG | + | - | - | + | + |
| PRO | - | - | - | + | + | LYS | + | - | + | + | + |
| BPH | - | + | + | - | - | CAT | + | + | - | + | + |
| BXY | - | - | + | - | - | OXI | - | - | - | + | + |

(+)Positivo, (-)Negativo. *Elaboración propia. 2022*

ANEXO 3.
CONCENTRACIÓN PROMEDIO DE UFC/GR DE SUELO

3.1 Concentración promedio de crecimientos (UFC/g de suelo).

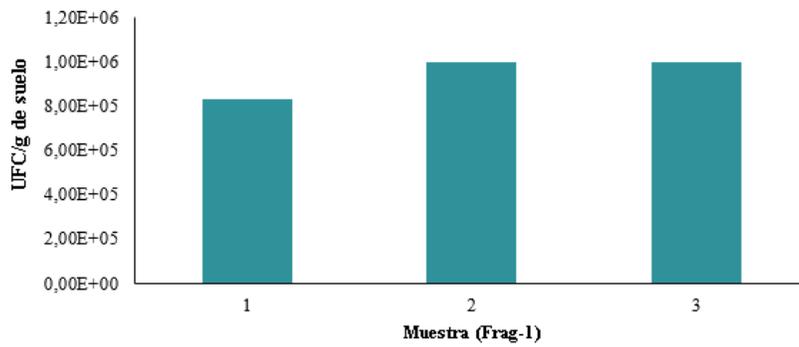
| Medio de Cultivo | Fragmento 1 | Fragmento 2 |
|--------------------------------------|--------------------|--------------------|
| Agar Chapman TTC (modificado) | 1,00E+07 UFC | 1,00E+07 UFC |
| | 1,00E+07 UFC | 1,00E+07 UFC |
| | 1,00E+07 UFC | 1,00E+07 UFC |
| Agar YMA (AZ) | 8,33E+05 UFC | 1,00E+04 UFC |
| | 1,00E+06 UFC | 1,00E+04 UFC |
| | 1,00E+06 UFC | 1,33E+04 UFC |
| Agar YMA (RH) | 1,33E+05 UFC | 6,67E+04 UFC |
| | 1,67E+05 UFC | 0,00E+00 UFC |
| | 4,00E+05 UFC | 0,00E+00 UFC |
| AGAR SMRS | 1,00E+04 UFC | 5,20E+07 UFC |
| | 4,07E+07 UFC | 3,97E+07 UFC |
| | 9,33E+06 UFC | 1,50E+07 UFC |
| AGAR RB | 3,00E+05 UFC | 1,33E+05 UFC |
| | 2,67E+05 UFC | 1,00E+05 UFC |
| | 1,00E+05 UFC | 1,00E+05 UFC |
| AGAR PDA | 4,00E+03 UFC | 1,00E+04 UFC |
| | 5,00E+03 UFC | 3,33E+03 UFC |
| | 2,67E+03 UFC | 1,67E+03 UFC |

Elaboración propia. 2022

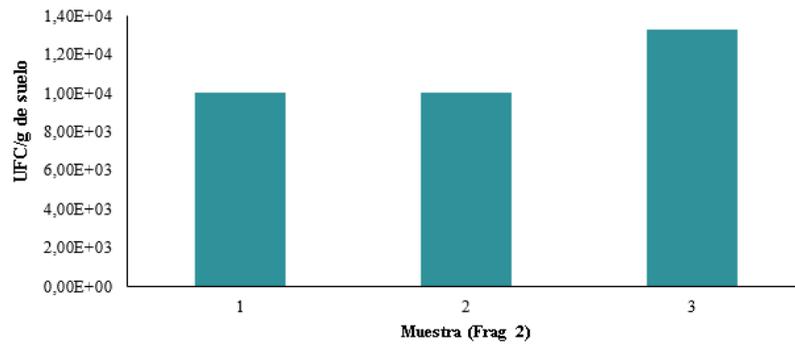
ANEXO 4.

GRÁFICAS REPRESENTATIVAS DE ALGUNOS MICROORGANISMOS

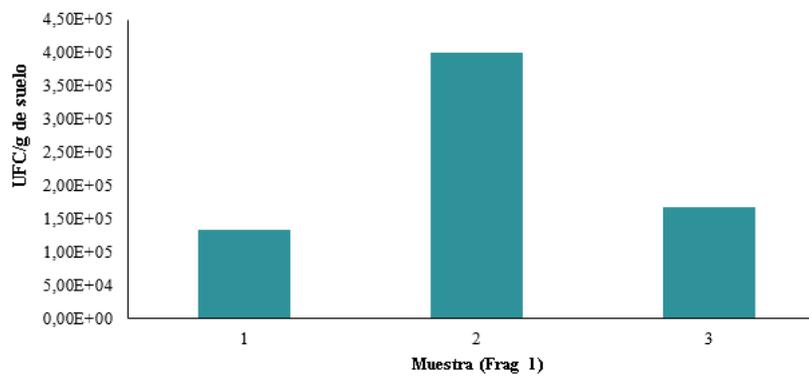
Promedio de UFC obtenidas del medio de cultivo YMA
(*Azospirillum sp*)



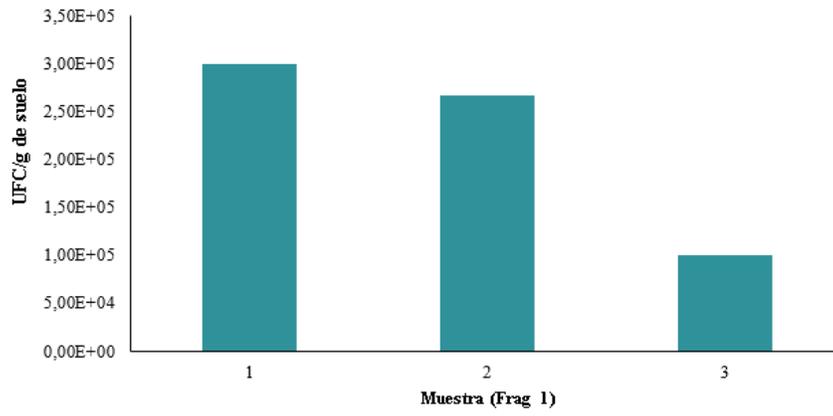
Promedio de UFC obtenidas del medio de cultivo YMA
(*Azospirillum sp*)



Promedio de UFC obtenidas del medio de cultivo YMA
(*Rhizobium sp*)



Promedio de UFC obtenidas del medio de cultivo SMRS



Promedio de UFC obtenidas del medio de cultivo RB

