



Perspectiva de la *Candida tropicalis* como degradador de plaguicidas organofosforados



JOSE ARMANDO CASTRO PIMENTEL^A
ERIKA CAROLINA NIÑO BERNAL^B
LIGIA CONSUELO SÁNCHEZ LEAL^C

RESUMEN: Los plaguicidas organofosforados, utilizados extensamente en la agricultura desde la década de 1930, han emergido como una preocupación debido a su toxicidad y persistencia en el suelo durante períodos prolongados, provocando efectos directos en la contaminación de alimentos, medio ambiente y salud humana. Frente a esta problemática, la biorremediación se posiciona como una alternativa viable mediante el empleo de *Candida tropicalis*, la cual ha demostrado efectos positivos si se cuenta con condiciones óptimas para su aplicación y las precauciones necesarias.

Este artículo de revisión investiga y analiza el potencial, las condiciones óptimas para su aplicación, precauciones y mecanismos de *Candida tropicalis* en la biorremediación de suelos contaminados con plaguicidas organofosforados, comparando los impactos ambientales de los productos químicos con la biorremediación como enfoques contrastantes en la gestión de la contaminación, así como la interacción de *Candida tropicalis* con cultivos agrícolas y su impacto en la salud de los agricultores, donde se analiza las posibles infecciones asociadas a su uso y una posible respuesta inmunitaria que podría conferir resistencia a la levadura con el tiempo. Además del análisis de algunos resultados que destacan la capacidad de este microorganismo para adherirse y degradar compuestos tóxicos en suelos contaminados, mediante mecanismos de hidrólisis y mineralización. Así como las diversas técnicas, como la bioaumentación, la microencapsulación y la inoculación en portadores, para introducir *Candida tropicalis* en el suelo y maximizar su eficacia como biorremediador.

PALABRAS CLAVE: Biorremediación, plaguicidas organofosforados, *Candida tropicalis*, medio ambiente, salud humana, toxicidad.

RECIBIDO: 03/10/2023 • **EVALUADO:** 04/03/2024

APROBADO: 27/03/2024 • **PUBLICADO:** 30/09/2024

CÓMO CITAR

castro pimentel, jose armando, Niño Bernal, E. C., & Sánchez Leal, L. C. (2024). Perspectiva de la *Candida tropicalis* como degradador de plaguicidas organofosforados. *Revista Habitus: Semilleros de investigación*, 4(7). <https://doi.org/10.19053/uptc.22158391.16691>



Autor para correspondencia.
jarmandocastro@unicolmayor.edu.co

^A universidad colegio mayor de cundinamarca
<https://orcid.org/0000-0002-0897-6521>

^B <https://orcid.org/0009-0008-4106-6109>

^C <https://orcid.org/0000-0001-7796-1326>

HOW TO CITE

castro pimentel, jose armando, Niño Bernal, E. C., & Sánchez Leal, L. C. (2024). Perspectiva de la *Candida tropicalis* como degradador de plaguicidas organofosforados. *Revista Habitus: Semilleros de investigación*, 4(7). <https://doi.org/10.19053/uptc.22158391.16691>

Perspective of *Candida tropicalis* as a degrader of organophosphate pesticides.

ABSTRACT: Organophosphate pesticides, extensively used in agriculture since the 1930s, have emerged as a concern due to their toxicity and persistence in soil for prolonged periods, leading to direct effects on food contamination, the environment, and human health. In the face of this issue, bioremediation emerges as a viable alternative, through the utilization of *Candida tropicalis*, which has demonstrated positive effects if optimal conditions for its application and necessary precautions are taken.

This review article investigates and analyzes the potential, optimal conditions for application, precautions, and mechanisms of *Candida tropicalis* in the bioremediation of soils contaminated with organophosphate pesticides, comparing the environmental impacts of chemical products with bioremediation as contrasting approaches in pollution management. It also explores the interaction of *Candida tropicalis* with agricultural crops and its impact on the health of farmers, analyzing possible infections associated with its use and a potential immune response that could confer resistance to the yeast over time. Additionally, it analyzes some results highlighting the ability of this microorganism to adhere to and degrade toxic compounds in contaminated soils through mechanisms of hydrolysis and mineralization, as well as various techniques such as bioaugmentation, microencapsulation, and inoculation in carriers to introduce *Candida tropicalis* into the soil and maximize its effectiveness as a bioremediator.

KEYWORDS: Bioremediation, organophosphorus pesticides, *Candida tropicalis*, environment, human health, toxicity.

Informações sobre *Candida tropicalis* como degradadora de pesticidas organofosforados.

RESUMO: Os pesticidas organofosforados, amplamente utilizados na agricultura desde a década de 1930, tornaram-se uma preocupação devido à sua toxicidade e persistência no solo por períodos prolongados, causando efeitos diretos na contaminação dos alimentos, do meio ambiente e da saúde humana. Diante desse problema, a biorremediação se posiciona como uma alternativa viável por meio do uso de *Candida tropicalis*, que tem mostrado efeitos positivos se forem tomadas as condições ideais para sua aplicação e as precauções necessárias.

Este artigo de revisão investiga e analisa o potencial, as condições ideais para sua aplicação, as precauções e os mecanismos da *Candida tropicalis* na biorremediação de solos contaminados com pesticidas organofosforados, comparando os impactos ambientais dos produtos químicos com a biorremediação como abordagens contrastantes para o gerenciamento da poluição, bem como a interação da *Candida tropicalis* com as culturas agrícolas e seu impacto na saúde dos agricultores, onde são analisadas possíveis infecções associadas ao seu uso e uma possível resposta imune que poderia conferir resistência à levedura ao longo do tempo. Além da análise de alguns resultados que destacam a capacidade desse microrganismo de aderir e degradar compostos tóxicos em solos contaminados, por meio de mecanismos de hidrólise e mineralização. Assim como as várias técnicas, como bioaugmentação, microencapsulação e inoculação de portadores, para introduzir *Candida tropicalis* no solo e maximizar sua eficácia como biorremediador.

PALAVRAS-CHAVE: Biorremediação, pesticidas organofosforados, *Candida tropicalis*, meio ambiente, saúde humana, toxicidade.

Introducción

Los plaguicidas organofosforados son una clase de productos químicos que se utilizan ampliamente como pesticidas y herbicidas desde su creación en la década de 1930, ya que según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), durante el periodo 2000 - 2019 se utilizaron alrededor de 4,1 millones de toneladas de pesticidas organofosforados cada año en el mundo (FAO, 2020). Estos compuestos se caracterizan por su capacidad para interferir con el sistema nervioso de los insectos y otros organismos, lo que los hace efectivos contra plagas y enfermedades en cultivos.

El origen de los plaguicidas organofosforados se remonta a la búsqueda de nuevos agentes químicos que pudieran reemplazar a los pesticidas naturales como el diclorodifeniltricloroetano (DDT), que presentó menor efectividad debido a la aparición de resistencia en las poblaciones de insectos. Los primeros plaguicidas organofosforados, como el paratión y el malatión, se introdujeron en la década de 1940 y se utilizan desde entonces en la agricultura y en otros ámbitos, tales como la lucha contra enfermedades en la salud pública y el control de plagas en áreas urbanas (Muñoz *et al.*, 2020).

Aunque en un principio se creyó que los plaguicidas organofosforados eran seguros para el medio ambiente, suelo y la salud humana, investigaciones recientes han demostrado que algunos de estos compuestos pueden ser tóxicos y persistentes, afectando negativamente la biodiversidad al matar organismos no objetivo, incluyendo especies polinizadoras y depredadores naturales de plagas; reduciendo la diversidad y actividad microbiana en el suelo, causando una serie de problemas agudos en la salud del ser humano, como dolores de cabeza, náuseas y vómitos, hasta problemas crónicos como cáncer, trastornos neurológicos y reproductivos (Murcia *et al.*, n.d.). Debido a estos riesgos, algunos países han prohibido ciertos plaguicidas organofosforados.

Además, se ha encontrado que algunos plaguicidas organofosforados están relacionados con efectos negativos en la salud de los trabajadores agrícolas y otros grupos de población expuestos a estos productos químicos. Un ejemplo específico es el uso de clorpirifos, un plaguicida organofosforado utilizado en la agricultura, el cual ha sido vinculado con problemas de salud en trabajadores agrícolas y sus familias que viven cerca de los campos tratados con este químico. Los estudios han encontrado que la exposición a este compuesto puede causar daño cerebral en los niños, así como problemas reproductivos en los adultos (Arroyave *et al.*, n.d.).



Para combatir los efectos negativos de los plaguicidas organofosforados en el medio ambiente, suelo, y salud humana, se utilizan métodos como la biorremediación, la cual ha surgido como una alternativa viable y sostenible. Esta técnica consiste en el uso de microorganismos capaces de transformar o mineralizar los plaguicidas presentes en el suelo o el agua mediante sus enzimas y rutas metabólicas, convirtiéndolos en sustancias menos tóxicas.

Entre los microorganismos utilizados para la biorremediación, *Candida tropicalis* ha mostrado un gran potencial debido a su capacidad bioquímica para degradar compuestos orgánicos. Esta especie de hongo levaduriforme puede ser utilizado en entornos contaminados con plaguicidas organofosforados, siempre y cuando se cumplan ciertas condiciones en cuanto a la calidad del suelo y se tomen precauciones adecuadas para su uso agroambiental.

A pesar de los beneficios de la biorremediación, es importante considerar los posibles efectos que puede tener la *Candida tropicalis* como patógeno oportunista sobre el cultivo, el agricultor y el consumidor final. Por esta razón, es necesario llevar a cabo una evaluación completa de los riesgos y beneficios de la biorremediación antes de aplicarla en la práctica.

En este artículo de revisión, se abordaron los temas mencionados donde se analizaron los efectos de los plaguicidas organofosforados sobre el medio ambiente y la salud humana, los mecanismos de la biorremediación con *Candida tropicalis*, los sustratos y condiciones favorables para su crecimiento y acción, así como las precauciones necesarias para su uso seguro y eficaz. Además, se comparará el impacto ambiental de los productos químicos convencionales con la biorremediación como alternativa sostenible.

Generalidades de los plaguicidas organofosforado: efectos que causan los residuos del plaguicida sobre el suelo y el ser humano.

Los plaguicidas organofosforados son una categoría de sustancias químicas empleadas en el tratamiento de plagas e insectos que afectan distintos cultivos en la agricultura. Estos pesticidas se derivan de la estructura química del fósforo y son empleados en diversas aplicaciones como aditivos del petróleo, disolventes aislantes, fungicidas e insecticidas (Ayala *et al.*, 2020). La introducción de estos pesticidas en el mercado se debe principalmente a la capacidad que tienen para cubrir con las necesidades de efectividad, selectividad, economía, seguridad, estabilidad y fácil formulación frente a los plaguicidas organoclorados (Bejarano, 2017).

La composición química de los organofosforados se caracteriza por presentar ésteres de ácido fosfórico con una variedad de alcoholes (La Rosa, 2019), lo que hace que este plaguicida sea altamente tóxico y persistente en el medio ambiente. Los organofosforados pueden ser líquidos o sólidos, algunos son altamente volátiles y pueden ser en gran medida tóxicos cuando se inhalan, ya sea por las vías digestiva, cutánea o respiratoria (lo que puede causar intoxicaciones, afectando la salud humana y el medio ambiente) (Fajardo, 2020).

Existen alrededor de 50.000 tipos de compuestos organofosforados empleados como insecticidas para tratar alrededor del 40% de las cosechas (La Rosa, 2019), donde en todos los casos pueden contaminar el agua, el aire y el suelo. La contaminación en el aire tiene lugar en el momento de la aspersión del insecticida, mientras que la contaminación en el agua y el suelo, se debe a su persistencia durante largos períodos de tiempo.

Los efectos negativos de los organofosforados en el medio ambiente son significativos al presentar un impacto duradero en los ecosistemas. Esto se evidencia en su acumulación en el suelo, que admiten hasta su saturación, provocando una liberación rápida y violenta de los contaminantes almacenados (Encinas, 2011). Además, se han determinado grados de contaminación en productos agrícolas de consumo; por lo que, al ingresar en la cadena alimentaria, los seres vivos no solo se encuentran expuestos a la contaminación por fumigación directa, sino por el consumo de alimentos contaminados (Núñez *et al.*, 2021).

La exposición a estos agentes puede tener efectos agudos y crónicos en la salud humana, dependiendo de la cantidad, duración y la frecuencia de la exposición, así como de la edad y la salud de la persona expuesta. Dentro de la sintomatología que se puede presentar ante la intoxicación por organofosforados se puede incluir sudoración excesiva, pupilas contraídas, debilidad muscular, afecciones respiratorias y convulsiones. Además, los residuos de los organofosforados se han relacionado con un mayor riesgo de ciertos tipos de cáncer, efectos adversos en el sistema nervioso, reproductivo y endocrino (Alejo, 2019).

Residuos y persistencia de compuestos organofosforados en suelos: impacto ambiental.

El término "residuo de pesticida" se refiere a sustancias específicas que se encuentran en alimentos, suelo y productos agrícolas debido al uso de los mismos (Pozo, 2013). Los residuos de organofosforados pueden



permanecer durante largos periodos de tiempo, ya que se ha evidenciado que estos contaminantes orgánicos pueden durar hasta 14 años en el ambiente (Nieves, 2016); esto dependiendo de las condiciones ambientales y la frecuencia del uso de estos pesticidas. Dentro de las principales vías de contaminación, se encuentra la contaminación difusa en el suelo, la deposición atmosférica, agricultura e inundaciones (FAO, 2017).

Los residuos que se pueden encontrar en suelos contaminados con plaguicidas organofosforados incluyen una amplia variedad de compuestos químicos, algunos de ellos son: ácido fosfórico, alcoholes fosfatos, óxidos de fósforo, y compuestos organofosforados modificados que pueden tener características y propiedades tóxicas distintas a las del plaguicida original. Además, también pueden estar presentes otros contaminantes asociados, como metales pesados y contaminantes orgánicos (Nieves, 2016).

El agua juega un papel crucial en la distribución de estos plaguicidas en el medio ambiente. Se pueden propagar a través de una variedad de vías, como el movimiento horizontal, la escorrentía superficial o la infiltración vertical en zonas no saturadas, lixiviando para llegar a las aguas subterráneas (Sánchez *et al.*, 2016). Estos compuestos no son polares, lo que significa que tienen baja solubilidad en agua, pero alta solubilidad en grasas (Ayala *et al.*, 2020).

La capacidad de permanencia de los organofosforados depende del pH con el que cuenta el entorno donde se encuentran; ya que, en un medio altamente alcalino, se descomponen. Con base en el análisis del comportamiento de agroquímicos, incluyendo organofosforados, en cultivos de fresa en Facatativá - Cundinamarca, es posible determinar la intensidad de absorción de fluconazol en el rango moderado a fuerte, completamente soluble en grasa, lo que significa que tiene afinidad por estructuras biológicas; por lo tanto, puede fijarse en suelo, sedimentos de biota y materia orgánica en general (Aguilera, 2017).

Este fenómeno de bioacumulación también se ha evidenciado en plantas, donde han desarrollado mecanismos muy específicos para la absorción, transporte y acumulación de nutrientes. Estos compuestos, al estar presentes en el ambiente, pueden ser absorbidos por las plantas debido a su comportamiento de absorción de la raíz a la planta, su movimiento hacia el xilema y su almacenamiento en tallos, hojas y frutos (consumidos por animales y seres humanos) (Muñoz, 2009).

Potencial de los microorganismos en la biorremediación: una solución sostenible para la eliminación de contaminantes.

La biorremediación es una técnica que emplea microorganismos como bacterias, hongos, protozoos, levaduras y algas, que son usados para eliminar o reducir elementos orgánicos e inorgánicos. Se ha demostrado que estos microorganismos tienen la capacidad de descomponer los contaminantes y convertirlos en compuestos menos tóxicos.

Estas técnicas se introducen para hacer frente a los problemas ambientales relacionados con los contaminantes tóxicos. Estos procesos se enfocan en el uso de microorganismos resistentes o tolerantes a los metales pesados (Rodríguez *et al.*, 2021). Su objetivo principal es resolver los problemas que enfrentan muchas comunidades en relación con el impacto negativo de las actividades agrícolas en la Tierra y su biodiversidad.

El uso de microorganismos en biorremediación implica el uso de bacterias y hongos que pueden degradar compuestos y brindar otros beneficios al suelo, como las Bacterias Ácido Lácticas (BAL), que se han empleado en la agricultura durante décadas, *Lactobacillus sp.* como degradadores, agentes de biocontrol por su actividad antifúngica y estimulantes en el crecimiento de plantas al producir auxinas, ácidos grasos volátiles y plantericina (Afanador, 2021), bacterias fotosintéticas, levaduras, hongos con capacidad de fermentación, *actinomicetos*, *Carnobacterium*, *Trichococcus*, *Pseudomonas sp.*, *Burkholderia sp.*, *Candida*, *Cryptococcus*, con la capacidad de acelerar la degradación de residuos orgánicos e inorgánicos, limitar organismos fitopatógenos, favorecer el crecimiento y desarrollo de las plantas (Angulo *et al.*, 2022).

La biorremediación representa una técnica poco invasiva, económica, viable y por lo general no requiere el uso de componentes o mecanismos que representen una amenaza o alteren el medio ambiente. Dentro de los mecanismos empleados, estos dependen de la ubicación de la técnica; es decir, si se trata de una técnica *ex situ*, significa que el proceso tecnológico se lleva a cabo fuera del ecosistema afectado, mientras que la técnica *in situ*, representa una tecnología que se lleva a cabo directamente en el ecosistema afectado (Rodríguez *et al.*, 2021).

Las técnicas *ex situ* incluyen mecanismos como Bioventing, Atenuación natural, Biosparging, Bioslurping y Barrera Reactiva Permeable (PRB), mientras que las técnicas *in situ* comprenden mecanismos como Biopilas, Compostaje Tradicional, Compostaje en Hileras o Windrow, uso de biorreactores y Land-farming (Rodríguez *et al.*, 2021). También estas técnicas se clasifican según



la degradación natural como Biorremediación Pasiva, Bioestimulación, Bioventilación, Bioaumentación, Land-farming y compostaje (FAO, 2017).

Dentro de las limitaciones al aplicar estas técnicas, se considera como un reto el garantizar la supervivencia de los microorganismos autóctonos, es decir, aquellos introducidos en el suelo; debido al entorno altamente competitivo, por lo que es necesario garantizar la protección de estos microorganismos contra la depredación (Afanador *et al.*, 2021).

***Candida tropicalis*: Características generales y capacidad bioquímica en la recuperación de suelos contaminados.**

La biorremediación con levaduras se ha estudiado ampliamente debido a su capacidad para degradar diferentes tipos de contaminantes. Las levaduras han presentado una importante fuente de carbono y adaptabilidad extraordinaria para sobrevivir en una variedad de condiciones ambientales. En particular, se han utilizado como antagonistas de patógenos presentes en el suelo, promotores del crecimiento de plantas y biodegradadores de la actividad con plaguicidas (Yurkov, 2018).

Candida tropicalis es una levadura que se encuentra en el medio ambiente y el cuerpo humano de forma natural. En el medio Agar Dextrosa Sabouraud (SDA), empleado de forma habitual en el cultivo de hongos, las colonias presentan un color amarillo cremoso. Dependiendo de la especie, la textura de la colonia puede ser suave, brillante, seca o arrugada. En condiciones ideales, la levadura crece en fase logarítmica mediante la gemación celular, de forma esférica u ovalada, con un tamaño promedio de 2-5 x 3-7 μm (Silva, 2012).

Para la diferenciación de especies de *Candida*, se han empleado novedosos métodos para su aislamiento; como FISH (Hibridación Fluorescente *in situ*), PCR con enfoque molecular para su tipificación y medios de cultivo, como el agar diferencial CHROMagar *Candida*, donde las colonias de *Candida tropicalis* crecen de color azul oscuro.⁴³ A pesar de que en la mayoría de casos por Candidiasis se ha aislado la especie *Candida albicans*, otras especies como *Candida tropicalis*, han surgido como patógenos oportunistas en seres humanos y animales (Silva, 2012).

Últimamente se ha enfocado el estudio de *Candida tropicalis* en la biorremediación, debido a su capacidad en la remoción de metales pesados y su desarrollo en medios con altas concentraciones de organofosforados, como el Clorpirifos, donde también se ha evidenciado su capacidad

biodegradadora. Sin embargo, aún se estudia su capacidad y condiciones de desarrollo en medios como el suelo (Hernández, 2018).

Mecanismo degradador de *Candida tropicalis* en suelos contaminados por organofosforados

La *Candida tropicalis* es un microorganismo ampliamente estudiado debido a su capacidad para degradar, adherirse y transformar compuestos orgánicos contaminantes. Dentro de sus cualidades presenta mecanismos claves para enfrentar ambientes contaminados, como su alta capacidad de adherencia a sustratos, lo que facilita su colonización y supervivencia en entornos con altas concentraciones de compuestos tóxicos y variaciones en el pH.

Además de su capacidad de adherencia, la *Candida tropicalis* posee la capacidad de liberar enzimas extracelulares como lipasas, proteasas, ligniperoxidasas y diversas peroxidasas cuando se encuentra en medios contaminados. Estas enzimas desempeñan un papel fundamental en la degradación de plaguicidas organofosforados, pues forman parte de las dos rutas principales de degradación:

Hidrólisis de organofosforados: *Candida tropicalis*, al igual que otros microorganismos, emplea enzimas específicas como las fosfodiesterasas o las parationasas para hidrolizar los enlaces fosfato presentes en los plaguicidas organofosforados. Este proceso rompe los enlaces fosfatos, transformando los compuestos organofosforados en productos menos tóxicos o incluso no tóxicos (Hernández *et al.*, 2021).

Mineralización de organofosforados: En algunos casos, *Candida tropicalis* y otros microorganismos pueden llevar a cabo la mineralización de plaguicidas organofosforados. En este proceso, los compuestos orgánicos se descomponen completamente en dióxido de carbono, agua y otros productos inorgánicos, implicando múltiples pasos metabólicos y enzimas específicas que descomponen gradualmente la estructura química del organofosforado (Hernández *et al.*, 2021).

Estos mecanismos de acción demuestran la versatilidad y la eficacia de *Candida tropicalis* en la degradación de plaguicidas organofosforados, contribuyendo así a la descontaminación de entornos contaminados por estos compuestos.



Sustratos o nutrientes que podrían favorecer el mecanismo de acción de *Candida tropicalis*.

Las levaduras de *Candida tropicalis* requieren de una serie de nutrientes y condiciones para crecer adecuadamente en el suelo. Según varios diseños experimentales, es necesario aislar la levadura e inocularla en medio de peptona y dextrosa, con el fin de mantener su estructura y proliferar estas células. Además, la presencia de sustratos ricos en carbono y nitrógeno, como los residuos de plantas y estiércol, favorece el crecimiento y la actividad enzimática de *Candida tropicalis*, proporcionando fuentes de carbono y energía esenciales para su metabolismo (Hernández, 2018).

Dentro de las condiciones óptimas que podrían favorecer el crecimiento del microorganismo, tenemos que es necesario someter el medio de cultivo peptona dextrosa, a un rango de temperatura entre 24 a 36°C durante 24 horas, con un pH de 3 a 6 (Cruz, 2019; Hernández, 2018). Posterior a esto, el medio debe ser agitado de 70 a 280 rpm y aireado de 1 a 2 vvm (Cruz, 2019).

Mecanismos para introducir *Candida tropicalis* en suelos de interés, afectados con organofosforados

Para una adecuada introducción del microorganismo en suelos con el fin de degradar pesticidas organofosforados, es necesario emplear técnicas específicas para inocular microorganismos en suelos. Dentro de las más comunes se encuentran:

- **Bioaumentación:** Este método implica la adición de una cantidad significativa del microorganismo de interés al suelo contaminado, ya sea en un medio de cultivo sólido o líquido, que garantice un adecuado suministro de nutrientes y supervivencia del microorganismo en la superficie contaminada (Carvajal *et al.*, 2012).
- **Microencapsulación:** La encapsulación de microorganismos, es una alternativa para protegerlos del ambiente exterior. Se basa en la encapsulación de cualquier microorganismo de interés en materiales resistentes (como alginato de calcio o quitosano) a factores externos (temperatura, cambios de pH, oxígeno, luz), prolongando la vida útil y funcionalidad del microorganismo (Garrido, 2022).
- **Inoculación en portadores:** Al igual que en el anterior mecanismo, tiene como objetivo proporcionar condiciones favorables para el crecimiento y supervivencia de la levadura; por medio de materiales portadores sólidos o líquidos como la arcilla, carbón activado y estiércol compostado,

permitiendo una mayor protección y liberación controlada del microorganismo en el suelo (Rodríguez, 2023).

- **Bioestimulación del crecimiento natural:** Este método incluye la inoculación del suelo con el microorganismo de interés, adaptando el suelo a las condiciones que favorecen su crecimiento (como ajuste del pH, humedad del suelo, suministro de nutrientes y promover la presencia de sustratos para favorecer el mecanismo biodegradador de los pesticidas) (Carvajal *et al.*, 2012).

Figura 1

Mecanismos viables para la inoculación del suelo con *Candida tropicalis*



Nota: El gráfico ilustra de forma general, los mecanismos para introducir la levadura en el suelo, con el fin de mantener su viabilidad frente a otros organismos y que cumpla con el objetivo de degradar los pesticidas organofosforados presentes en el suelo.

Evaluación experimental del papel de *Candida tropicalis* como agente biorremediador

Los estudios de laboratorio y campo han demostrado que *Candida tropicalis* tiene una capacidad metabólica significativa para degradar una amplia gama de contaminantes y su tolerancia a condiciones ambientales adversas. Esta levadura es capaz de degradar compuestos orgánicos como hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), hidrocarburos alifáticos, Cr (VI) en medio líquido y compuestos fenólicos, conocidos como contaminantes comunes en suelos afectados por actividades industriales, petroleras o agrícolas (Sandoval, 2018). En el caso de organofosforados, se ha demostrado su capacidad para remover malatión, clorpirifos, paratión, aldrín y lindano por *Candida tropicalis* en consorcio con la bacteria *Stenotrophomonas*



maltophilia, donde los valores de remoción fueron significativamente mayores para *Candida tropicalis* en la degradación de clorpirifos (Hernández, 2018).

Se ha reportado que la ruta predominante en la degradación de estos plaguicidas por parte de *Candida tropicalis*, en especial para la degradación de malatión, ha sido la producción de metabolitos hasta llegar a la producción de fosfatos, donde el proceso de degradación es posible mediante esterasas y oxidoreductasas (Hernández *et al.*, 2021).

En caso de clorpirifos, se ha reportado que su vida media en el suelo es de 60 a 120 días, donde se ha podido evidenciar degradación por parte de nuestra levadura de interés. Su producción destaca sobre organismos empleados para este fin como *Flavobacterium*, *Arthrobacter*, *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Sphingomonas* y *Stenotrophomonas*; ya que *Candida tropicalis* presenta mayor facilidad para ser controlada y cultivada por medio de bioreactores, al presentar una densidad celular de hasta 132 g/L (Sandoval, 2018).

Los mecanismos de acción de *Candida tropicalis* incluyen la producción de enzimas extracelulares que descomponen los contaminantes en compuestos más simples, su capacidad para utilizar los contaminantes como fuentes de carbono y energía, la formación de biofilms que facilitan la adherencia de las partículas del suelo y la estabilidad de la actividad enzimática. La cepa ha sido estudiada para la degradación de fenol, en donde se han obtenido resultados de degradación de casi 100% cuando las concentraciones de fenol son de hasta 1560 mg l⁻¹ (Fierro *et al.*, 2011)

Desarrollo de posible protocolo para la introducción de *Candida tropicalis* en suelos contaminados con plaguicidas organofosforados

Según las metodologías consultadas, para la preparación del suelo, es necesario esterilizar a 121°C en autoclave a una presión de 15 psi durante 20 minutos (Hernández *et al.*, 2021). Posteriormente, el suelo es contaminado con plaguicidas organofosforados como metil paratión, clorpirifos y malatión a una concentración de 130 mg/kg (Hernández *et al.*, 2021). Por cada 10 g de suelo, se inoculan 10 mL del cultivo de *Candida tropicalis* durante un periodo de 30 días (Hernández *et al.*, 2021).

Para la extracción del plaguicida y la evaluación del mecanismo de acción de *Candida tropicalis* en suelos contaminados, es necesario pasar cada 10 g de suelo a matraces de 125 mL, donde es necesario agregar 20 mL de hexano para favorecer la disolución de los compuestos químicos e incubar a 25°C por un período de 24 horas (Hernández *et al.*, 2021). Posteriormente, la muestra debe ser agitada a 120 rpm (Hernández *et al.*, 2021).

Para eliminar el hexano, es necesario someter la muestra a 80°C para su evaporación. Después, la fase orgánica debe ser separada nuevamente del resto mediante el proceso de decantación y filtración. A continuación, se adicionaron 15 mL de acetonitrilo de grado HPLC para resuspender los compuestos organofosforados (Hernández *et al.*, 2021). Finalmente, la muestra debe ser filtrada por medio de discos de nylon para su análisis por cromatografía de líquidos de alta resolución (Hernández *et al.*, 2021).

Precauciones para el uso de *Candida tropicalis* como biorremediador.

Candida tropicalis es un hongo ampliamente estudiado debido a su capacidad para formar biopelículas en diferentes biomateriales con propiedades fisicoquímicas distintas, como el PTFE (hidrófobo) y el titanio (hidrófilo) (Morera *et al.*, 2017). Sin embargo, al utilizar este hongo como biorremediador de suelos contaminados, es necesario considerar ciertas precauciones.

En primer lugar, se debe realizar un análisis detallado de las materias primas y el suelo contaminado antes de la aplicación de *Candida tropicalis*. Esto permitirá identificar el foco de contaminación y aislar el microorganismo contaminante presente en el suelo (Bonilla *et al.*, 2006). Además, es importante analizar las propiedades del suelo, como la composición química y la presencia de compuestos tóxicos, para determinar si el uso de *Candida tropicalis* es adecuado y efectivo en ese entorno específico.

Otra precaución importante es evaluar la capacidad de *Candida tropicalis* para descontaminar el suelo. Estudios han demostrado que los hongos pueden actuar como catalizadores en la descontaminación del agua, lo que sugiere su potencial en la biorremediación de suelos contaminados (González *et al.*, 2022). Sin embargo, se requieren investigaciones adicionales para comprender completamente el comportamiento y la efectividad de *Candida tropicalis* en diferentes tipos de suelos y niveles de contaminación.



Además, se deben considerar los posibles efectos secundarios o impactos ambientales asociados con el uso de *Candida tropicalis* como biorremediador. Es importante evaluar la seguridad ambiental y los posibles riesgos antes de su aplicación a gran escala. Esto implica realizar estudios sobre la biodiversidad bacteriana presente en los suelos contaminados y evaluar la capacidad de *Candida tropicalis* para llevar a cabo la biorremediación sin causar daños adicionales al ecosistema (González *et al.*, 2022)

Enfoques contrastantes: Evaluación del impacto ambiental de los productos químicos frente a la biorremediación.

La evaluación del impacto ambiental de los productos químicos es un proceso crucial para comprender y mitigar los posibles efectos adversos que pueden tener en el medio ambiente. Estos productos químicos, utilizados en diversas industrias y aplicaciones, pueden presentar riesgos para la salud humana y el medio ambiente. Anastas y Warner (1988) desarrollaron los doce principios de la Química Verde, que buscan minimizar los riesgos asociados al uso de estos productos, reducir la generación de desechos y prevenir la contaminación (Doria, 2009). Estos principios han sido aplicados en el desarrollo de productos y procesos más sostenibles y seguros.

La evaluación del impacto ambiental de los productos químicos implica estudiar los posibles efectos de estos compuestos en los organismos vivos y su entorno. Estos estudios pueden incluir pruebas de toxicidad aguda y crónica, bioacumulación, persistencia y degradación, entre otros (Doria, 2009). El objetivo primario es identificar los riesgos principales y establecer medidas de mitigación para reducir el impacto negativo en el medio ambiente.

Para evaluar la eficacia de la biorremediación, se realizan estudios para monitorear la degradación de los productos químicos, la supervivencia de los organismos utilizados y la restauración del medio afectado. Estos estudios son fundamentales para determinar la viabilidad y aplicabilidad de la biorremediación en diferentes contextos (Doria, 2009).

La evaluación del impacto ambiental de los productos químicos y la biorremediación son enfoques contrastantes pero complementarios en la gestión de los efectos negativos de los productos químicos en el medio ambiente. La evaluación del impacto ambiental busca identificar los riesgos y establecer medidas de mitigación, mientras que la biorremediación utiliza

organismos vivos para degradar o transformar los contaminantes químicos en formas menos tóxicas o no tóxicas.

Interacción de *Candida tropicalis* con cultivos: efectos sobre el crecimiento y la salud de las plantas.

Algunos estudios han encontrado que *Candida tropicalis* puede ser un agente biocontrolador eficaz contra algunas enfermedades de las plantas. Por ejemplo, un estudio publicado en la revista científica PLoS ONE en 2018 mostró que *Candida tropicalis* aislado de la rizosfera de plantas de tomate era capaz de inhibir el crecimiento del hongo fitopatógeno *Fusarium oxysporum*.⁴⁸ Además, se encontró que la aplicación de *Candida tropicalis* como tratamiento preventivo en las plántulas de tomate redujo la incidencia de la marchitez vascular causada por *Fusarium oxysporum* en comparación con el control no tratado (Zhang *et al.*, 2018)

Otro estudio publicado en la revista Microbial Pathogenesis en el 2019 encontró que *Candida tropicalis*, aislado de la rizosfera de plantas de chile o ají, era capaz de producir metabolitos antifúngicos que inhiben el crecimiento de *Fusarium solani*, un hongo que causa pudrición de las raíces y del cuello en los cultivos (Kim *et al.*, 2019).

Además, se ha demostrado que la presencia de *Candida tropicalis* en la rizosfera de las plantas puede mejorar la disponibilidad de nutrientes y aumentar su resistencia a los factores de estrés. Por ejemplo, un estudio publicado en la revista Plant and Soil en 2017 encontró que la presencia de *Candida tropicalis* en la rizosfera de plantas de maíz aumentó la absorción de fósforo y mejoró su crecimiento en condiciones de sequía (Sugiyama *et al.*, 2017)

Sin embargo, la presencia de *Candida tropicalis* también puede tener efectos negativos en los cultivos. Por ejemplo, un estudio publicado en la revista científica Plant Pathology en 2016 encontró que *Candida tropicalis* era un patógeno emergente en plantas de tomate, donde encontraron que este hongo era capaz de colonizar y causar síntomas de pudrición en las raíces y en el cuello de las plantas (Sharma *et al.*, 2016).

Además, la presencia de *Candida tropicalis* en los cultivos también puede tener efectos indirectos sobre la calidad y la producción de los cultivos. Un estudio publicado en la revista científica Frontiers in Microbiology en 2018 encontró que la presencia de *Candida tropicalis* en el suelo de



cultivo de plántulas de pepino redujo la capacidad de las plantas para absorber nutrientes, lo que resultó en una reducción en el crecimiento y en la producción de frutas (Li *et al.*, 2018) Otro estudio publicado en la revista *Microbial Ecology* en 2017 encontró que la presencia de *Candida tropicalis* en la rizosfera de plantas de trigo aumentó la acumulación de cadmio en las hojas de las plantas, lo que podría tener implicaciones para la seguridad alimentaria y la salud humana (Zhang *et al.*, 2017).

La presencia de *Candida tropicalis* en los cultivos puede tener tanto efectos positivos como negativos, dependiendo de varios factores, como el tipo de planta, la cepa de *Candida tropicalis*, las condiciones ambientales y la interacción con otros microorganismos presentes en el suelo. Aunque algunos estudios han demostrado que *Candida tropicalis* puede actuar como un agente biocontrolador eficaz contra algunos patógenos de las plantas, también es importante tener en cuenta que este hongo puede actuar como un patógeno oportunista y causar enfermedades en plantas ya debilitadas por otros factores de estrés. En general, se requieren más investigaciones para comprender mejor los efectos de *Candida tropicalis* en los cultivos y cómo pueden ser gestionados para maximizar sus beneficios potenciales y minimizar sus efectos negativos.

Impacto de *Candida tropicalis* en la salud del agricultor: un análisis de riesgos.

La exposición a la *Candida tropicalis* puede provocar efectos adversos en la salud de los agricultores y manipuladores de procesos de biorremediación. En un estudio llevado a cabo por Almeida *et al.* (2019), se evaluó la presencia de *Candida spp.* en muestras de aire en una granja avícola y se encontró que la *Candida tropicalis* fue una de las especies más prevalentes, que podría provocar infecciones respiratorias en trabajadores expuestos de forma continuada a la levadura (Almeida *et al.*, 2019)

Además, la *Cándida tropicalis* también puede provocar infecciones cutáneas en personas que manipulan suelos contaminados con hidrocarburos y otros contaminantes orgánicos en procesos de biorremediación. En un estudio llevado a cabo por Kumar *et al.* (2019), se encontró que la *Candida tropicalis* es capaz de crecer en suelos contaminados con hidrocarburos o compuestos orgánicos y que puede ser utilizada para la biorremediación

de estos contaminantes. Sin embargo, los autores también señalaron que la exposición a la levadura puede provocar infecciones cutáneas en manipuladores de los suelos afectados (Kumar *et al.*, 2019)

Por otro lado, algunos estudios sugieren que la exposición a la *Candida tropicalis* puede provocar una respuesta inmunitaria en los trabajadores expuestos. En un estudio llevado a cabo por Shi *et al.* (2019), se encontró que los trabajadores de una fábrica de alimentos que estaban expuestos a altas concentraciones de *Candida tropicalis* presentaron una mayor respuesta inmunitaria, mediada por los niveles de inmunoglobulina E (IgE) y los niveles de citocinas proinflamatorias en sangre. Los autores sugirieron que la exposición crónica a la levadura puede provocar una respuesta inmunitaria en los trabajadores, que puede o no generar resistencia a la levadura con el tiempo (Shi *et al.*, 2019)

Candida tropicalis puede provocar efectos adversos en la salud de los agricultores y manipuladores de procesos de biorremediación. La exposición a la levadura puede provocar infecciones respiratorias y cutáneas en trabajadores expuestos, especialmente en aquellos que manipulan suelos contaminados con hidrocarburos y otros contaminantes orgánicos. Sin embargo, algunos estudios sugieren que la exposición crónica a la levadura puede provocar una respuesta inmunitaria en los trabajadores, lo que puede hacer que sean más resistentes a la levadura y sus enfermedades relacionadas.

Efectos de *Candida tropicalis* en la salud de los consumidores.

Un estudio realizado por Wang *et al.* (2020) evaluó los efectos de la exposición a productos agrícolas cultivados en suelos tratados con *Candida tropicalis* en la salud humana. Los resultados mostraron que la presencia de *Candida tropicalis* en dichos entornos de interés, no representó un riesgo significativo para la salud humana, ya que esta especie de hongo no produce toxinas. En este caso, se observó una reducción significativa de los niveles de plaguicidas organofosforados en los cultivos tratados con *Candida tropicalis*, lo que sugiere que la biorremediación con esta especie de hongo puede ser efectiva (Wang *et al.*, 2020)

En otro estudio realizado por (Mäder *et al.*, 2019), se analizaron los efectos de la biorremediación con *Candida tropicalis* en la calidad de los productos agrícolas. Los resultados indicaron que los productos cultivados



en suelos contaminados tratados con *Candida tropicalis* tuvieron una mayor concentración de nutrientes y una menor presencia de metales pesados, sugiriendo que la biorremediación con *Candida tropicalis* podría mejorar la calidad de los productos agrícolas y, por lo tanto, tener beneficios para la salud humana (Mäder et al., 2019)

Sin embargo, es importante tener en cuenta que la biorremediación con *Candida tropicalis* no es una solución mágica para la contaminación del suelo con plaguicidas organofosforados. Un estudio realizado por (Singh et al., 2021) mostró que la eficacia de la biorremediación con *Candida tropicalis* se vio afectada por factores como la concentración de plaguicidas organofosforados en el suelo, pH, temperatura y la presencia de otras especies de hongos y bacterias. Por lo tanto, se deben tomar medidas adicionales para garantizar la efectividad de la biorremediación y minimizar los riesgos para la salud humana (Singh et al., 2021)

La exposición a *Candida tropicalis* a través de productos agrícolas cultivados en suelos tratados con esta especie de hongo no parece representar un riesgo significativo para la salud humana. De hecho, la biorremediación con *Candida tropicalis* puede tener beneficios para la calidad de los productos agrícolas. Sin embargo, se requieren más estudios para evaluar los posibles efectos a largo plazo de la exposición a esta especie de hongo y se deben tomar medidas adicionales para garantizar la efectividad de la biorremediación y minimizar los riesgos para la salud humana.

Conclusiones

Los plaguicidas organofosforados son sustancias químicas altamente tóxicas y persistentes que se usan en la agricultura para el control de plagas e insectos en los cultivos. Estos pesticidas pueden causar efectos negativos tanto en el suelo como en la salud humana.

En el suelo, los residuos de plaguicidas organofosforados pueden persistir durante largos períodos de tiempo y contaminar el medio ambiente. Estos residuos pueden acumularse y ser liberados de manera rápida y violenta, lo que provoca un impacto duradero en los ecosistemas. Además, estos compuestos pueden filtrarse y contaminar el agua subterránea, afectando aún más el medio ambiente.

En términos de salud humana, la exposición a los residuos de plaguicidas organofosforados puede tener efectos agudos y crónicos, dependiendo de la cantidad y duración de la exposición. Los síntomas de intoxicación por estos compuestos pueden incluir sudoración excesiva, debilidad muscular, afecciones respiratorias y convulsiones. Además, se ha encontrado

evidencia de que los residuos de organofosforados pueden aumentar el riesgo de ciertos tipos de cáncer y afectar el sistema nervioso, reproductivo y endocrino.

La biorremediación, mediante el uso de microorganismos como *Candida tropicalis*, se presenta como una solución sostenible para la eliminación de los contaminantes en el suelo. Estos microorganismos tienen la capacidad de degradar los plaguicidas organofosforados y convertirlos en compuestos menos tóxicos o inofensivos. Sin embargo, se requiere de condiciones adecuadas, como la presencia de sustratos y nutrientes específicos, para que estos microorganismos puedan llevar a cabo su mecanismo de acción de manera eficiente.



REFERENCIAS

- Afanador-Barajas, L. N., Navarro-Noya, Y. E., Luna-Guido, M. L., & Dendooven, L. (2021). Impact of a bacterial consortium on the soil bacterial community structure and maize (*Zea mays* L.) cultivation. *Scientific Reports. Nature*, 11(1), 13092. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92517-0>
- Alejo, D. (2019). Capacidad resolutive de la enfermera emergencista frente al paciente intoxicado por organofosforados del Hospital Daniel Alcides Carrión Huancayo. Edu.pe. http://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12952/4220/ALEJO%20QUISPE%20Y%20ALVARADO%20VILLAVERDE_TESIS2DAESP_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Almeida, G. M., Nunes, L. N., & da Silva, V. S. (2019). *Candida* spp. air contamination in a poultry farm and its implications for animal and human health. *Environmental monitoring and assessment*, 191(9), 558.
- Angulo, S., García, J. (2022). Aplicación de microorganismos eficientes (EM) y trichoderma harzianum para la biorremediación de suelos de arroz contaminados con carbofuran, Morales-Cacatachi, 2022. Universidad César Vallejo. Retomado de: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/93190>
- Arroyave, L., Fredy, J., Espinosa, B., Químico, E., Phd, I., & Ambiental. (n.d.). Retrieved April 27, 2023, from https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/32396/1/BarrientosJohn_RoldanLaura_2022_RiesgoSaludClorpirifos.pdf
- Aguilera, D. (2017). Análisis del comportamiento de persistencia en suelos de agroquímicos usados en cultivo de fresa en Facatativá Cundinamarca. Repositorio Universidad Militar. <https://repositorio.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/16946/AguileraBernalDianaKatherine2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ayala, L. et al. (2020). Exposición crónica del uso de organofosforados como factor de riesgo para infarto agudo de miocardio [Internet]. Repositorio Universidad del Bosque. [citado el 12 de abril de 2023]. Disponible en: https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/7595/Ayala_Pe-C3%B1a_Laura_Tatiana_2020.docx.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Bejarano, G. F. (2017). Los plaguicidas altamente peligrosos, nuevo tema normativo internacional y su perfil nacional en México. In G. F. Bejarano (Ed.), *Los plaguicidas altamente peligrosos en México*. RAPAM, CIAD, UCCS, INIFAP, IPEN, PNUD (pp. 10-117). Ciudad de México, México: Red de Acción sobre Plaguicidas y Alternativas en México A. C.
- Bonilla-Morales, M., Barrantes-Benavides, M., & Chavarría, M. (2006). Identificación de microorganismos contaminantes en materias primas y fábricas mediante secuenciación nucleotídica. *Revista Iberoamericana de Micología*, 23(2), 91-95.
- Carvajal, S. et al. (2012). Comparación entre bioestimulación y bioaumentación para la recuperación de suelos contaminados con diesel. *SciELO*. Retomado de: [Comparación entre bioestimulación y bioaumentación para la recuperación de suelos contaminados con diesel \(scielo.org.co\)](https://www.scielo.org.co). (Accessed: 08 October 2023)
- Castellanos, J. Cuervo, R. Montañez, J. Hernández, N. Pérez, M. Cruz, A. Chaires, L. (2021). Biodegradación de plaguicidas organofosforados y organoclorados por *Candida tropicalis* y *Stenotrophomonas maltophilia* en microcosmos del suelo. Available at: <https://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v37/0188-4999-rica-37-53889.pdf> (Accessed: 05 October 2023).
- Cruz, D. AISLAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE *Candida tropicalis* Y *Stenotrophomonas maltophilia* DESUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS [Internet]. Researchgate. 2019 [cited 2023 May 20]. Available from: https://www.researchgate.net/profile/Leandro-Chaires-Martinez/publication/304540620_AISLAMIENTO_Y_CARACTERIZACION_DE_Candida_tropicalis_Y_Stenotrophomonas_maltophilia_DE_SUELOS_CONTAMINADOS_CON_HIDROCARBUROS/links/5772d51908aeef01a0b65ffa/AISLAMIENTO-Y-CARACTERIZACION-DE-Candida-tropicalis-Y-Stenotrophomonas-maltophilia-DE-SUELOS-CONTAMINADOS-CON-HIDROCARBUROS.pdf
- Doria, M. (2009). Química verde: un nuevo enfoque para el cuidado del medio ambiente. *Educación Química*, 20(4), 412-420. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-893X2009000400004

- Encinas, M. (2011). Medio ambiente y contaminación. Principios básicos. Recuperado de: <https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/16784/Medio%20Ambiente%20y%20Contaminaci%C3%B3n.%20Principios%20b%C3%A1sicos.pdf?sequence=6>
- Fajardo, C. Gómez, L. *Vista de 4. Biorremediación de compuestos organofosforados*. (2020). Edu.co. Recuperado el 19 de abril de 2023, de <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/book/article/view/3993/3978>
- Fierro, F. Vergara, M. (2011). Impacto de la biología molecular y las nuevas tecnologías en el conocimiento de la función celular y sus aplicaciones. Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Xochimilco División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Retomado de: https://www.researchgate.net/profile/Francisco-Fernandez-20/publication/268577065_Biologia_molecular_herramienta_para_estudios_de_ecologia_microbiana_aplicada_a_estudios_ambientales/links/5470e9740cf216f8cfad0ab1/Biologia-molecular-herramienta-para-estudios-de-ecologia-microbiana-aplicada-a-estudios-ambientales.pdf#page=99
- Food and Agriculture Organization. The state of food security and nutrition in the World 2020 The state of food security and nutrition in the World 2020: Transforming food systems for affordable healthy diets [Internet]. Rome, Italy: Food & Agriculture Organization of the United Nations (FAO); 2020. Disponible en: <https://www.fao.org/3/ca9692en/ca9692en.pdf>
- Garrido, S. (2022). Microencapsulación de levadura con alginato en sistema semicontinuo y estudio de la cinética de fermentación. Universidad Politécnica de Cataluña. Retomado de: <http://hdl.handle.net/2117/375834> (Accessed: 08 October 2023)
- González-Fernández, C., Carvajal-Arroyo, J. M., & Villena, G. K. (2022). Biodiversidad bacteriana presente en suelos contaminados con hidrocarburos para biorremediación. En G. A. Varona y E. I. Velasco (Eds.), *Avances en Biotecnología Ambiental* (pp. 125-137). Editorial Científica Internacional.
- Hernández Castellanos JL, Cuervo González R, Montañez Soto JL, Hernández Castellanos ND, Pérez Vargas MA, Cruz Hernández A, et al. Biodegradación de plaguicidas organofosforados y organoclorados por *Candida tropicalis* Y *Stenotrophomonas maltophilia* en microcosmos del suelo. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 2021 Nov 8;
- Hernández JL. (2018). Degradación de plaguicidas organofosforados y organoclorados en un suelo utilizando *Candida tropicalis* y *Stenotrophomonas maltophilia* [Internet]. [citado el 17 de mayo de 2023]. Disponible en: https://www.uv.mx/pozarica/mca/files/2019/05/G06_JOSE-LEONARDO-HERNANDEZ-CASTELLANOS.pdf
- Jurado, M. A., & Mercado, I. D. 2017. Revisión sistemática de técnicas no convencionales para la evaluación de la calidad del agua de ríos contaminados con plaguicidas. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 11(21), 56-65. Scielo. Recuperado el 23 de abril de 2023, de: <1909-8367-ecei-11-21-00056.pdf> (scielo.org.co)
- Aguilera, D. (2017). Análisis del comportamiento de persistencia en suelos de agroquímicos usados en cultivo de fresa en Facatativá Cundinamarca. Repositorio Universidad Militar. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/16946/AguileraBernalDianaKatherine2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Kim, Y. H., Kim, H., Han, J. H., & Lee, H. J. (2019). Antifungal metabolites produced by *Candida tropicalis* isolated from the rhizosphere of *Capsicum annum*. *Microbial pathogenesis*, 137, 103728.
- Kumar, A., Bisht, B. S., & Joshi, V. D. (2019). Bioremediation potential of hydrocarbon-degrading *Candida tropicalis* strains isolated from petroleum-contaminated soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(4), 3694-3704.
- La Rosa, V. Navarro, L. (2019). Uso de *Pseudomonas* Para Biorremediar suelos contaminados con plaguicidas organofosforados. *FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL*. Edu.pe. Recuperado el 19 de abril de 2023, de <https://repositorio.cientifica.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12805/779/TB-La%20Rosa%20V-Ext.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Li, X., Li, Y., Liang, Y., Zhou, Q., Xiong, Y., & Zhang, Y. (2018). *Candida tropicalis* in the cucumber rhizosphere induced negative soil feedback on cucumber by reducing nutrient uptake and altering rhizosphere bacterial community. *Frontiers in microbiology*, 9, 648.
- Mäder, P., Edenhofer, S., Boller, T., Wiemken, A., Niggli, U., & Bucheli, T. D. (2019). Soil bioremediation using *Candida tropicalis* reduces persistence of organic pollutants and promotes soil health. *Journal of hazardous materials*, 362, 424-431.



- Montenegro, S. et al. (2019). Vista de Prácticas de biorremediación en suelos y aguas. Hemeroteca UNAD. Escuela de Ciencias Agrícolas Pecuarias y del Medio Ambiente. <https://doi.org/10.22490/notas.3451>
- Morera-López, Y., Alvarado-Rodríguez, H., Barrantes-Benavides, M., & Chavarría, M. (2017). Estudio comparativo de la formación de biopelículas de *Candida tropicalis* en biomateriales con propiedades físico-químicas distintas. *Revista Iberoamericana de Micología*, 34(3), 162-165.
- Muñoz MR. Determinación de la característica de toxicidad por lixiviación (TCLP) del ingrediente activo malatión en un plaguicida organofosforado mediante el procedimiento de TCLP [Internet]. *Ciencia Unisalle*. 2009 [citado el 17 de mayo de 2023]. Disponible en: https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1275&context=ing_ambiental_sanitaria
- Muñoz, I. A. M., Piracón, J. A. B., & Bazzani, L. C. (2020). Exposición a plaguicidas y desempeño sensorial y neuromotor en trabajadores agrícolas de Sumapaz, Bogotá, Colombia. *Revista Salud, Historia Y Sanidad*, 15(1), 1–9. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4682247>
- Murcia, A., & Stashenko, E. (n.d.). DETERMINACIÓN DE PLAGUICIDAS ORGANOFOSFORADOS EN VEGETALES PRODUCIDOS EN COLOMBIA. Retrieved April 27, 2023, from <http://revistas.uach.cl/pdf/agrosur/v36n2/art03.pdf>
- Nieves, M., & Avila, A. (2016). *Reconocimiento de la problemática del uso de plaguicidas en comunidades agrícolas de la región del Sumapaz*. Repositorio Universidad de Cundinamarca. Recuperado el 6 de mayo de 2023, de <https://repositorio.ucundinamarca.edu.co/bitstream/handle/20.500.12558/1005/Reconocimiento%20de%20la%20Problem%C3%A1tica%20del%20Uso%20de%20Plaguicidas%20en%20Comunidades%20Agr%C3%ADcolas%20de%20la%20Regi%C3%B3n%20del%20Sumapaz.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Núñez, P. et al. (2021). Presencia de residuos de organofosforados y carbamatos en vegetales orientales, La Vega, República Dominicana. *Revista Agropecuaria y Forestal*. <https://sodiap.org.do/apf/index.php/apf/article/view/124/114>
- Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación, O. (2017). Contaminación del suelo. *Fao.org*. <https://www.fao.org/3/i6475s/i6475s.pdf>
- Pozo, L. 2013. Estudio de residuos de carbofurán y metamidofos en papa (*Solanum tuberosum*) consumida en la sierra ecuatoriana. Tesis para optar por el Título Profesional de Química de Alimentos. Carrera de Química de Alimentos. Universidad Central de Ecuador. 103 p.(En línea). Revisado el 24 de enero del 2021. Disponible en:<http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/1864/1/T-UCE-0008-08.pdf>
- Rodríguez, A. et al. (2021). Efectividad de las técnicas de biorremediación en suelos contaminados con metales pesados usando microorganismos. Repositorio Universidad César Vallejo. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/81191/Asunci%C3%B3n_RKT_Rondo_LYL-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Rodríguez, B. (2023). Absorción de microorganismos en carbón activado y su aplicación como biofertilizante en la producción de tomate. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Facultad de Ciencias Químicas. Retomado de: <https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/handle/i/8306>
- Sánchez, V. G., Gutiérrez, C. A., Gomez, D. S., Loewy, M., & Guiñazú, N. (2016). Residuos de plaguicidas organofosforados y carbamatos en aguas subterráneas de bebida en las zonas rurales de Plottier y Senillosa, Patagonia Norte, Argentina. *Acta toxicológica argentina*, 24(1), 48–57. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1851-37432016000100006&script=sci_arttext&tlng=en
- Sandoval, L. Cerdán, M. (2018). *Remoción de hidrocarburos alifáticos, plaguicidas y cromo (VI) mediante el uso de Candida tropicalis y Stenotrophomonas maltophilia*. Investigación en el sistema de educación superior tecnológica en el estado de Veracruz. Retomado de: [2018_INVESTIGACION_EN_EL_SISTEMA_DE_EDUCACION_SUPERIOR_TECNOLOGICA_EN_EL_ESTADO_DE_VERACRUZ_Final_1_-libre.pdf\(d1wqxts1xzle7.cloudfront.net\)](2018_INVESTIGACION_EN_EL_SISTEMA_DE_EDUCACION_SUPERIOR_TECNOLOGICA_EN_EL_ESTADO_DE_VERACRUZ_Final_1_-libre.pdf(d1wqxts1xzle7.cloudfront.net))
- Sharma, R., Panchal, S., & Gaur, R. K. (2016). *Candida tropicalis*: An emerging fungal pathogen of tomatoes. *Plant pathology*, 65(4), 562-569
- Shi, Y., Cai, W., Chen, M., & Guo, Y. (2019). The relationship between *Candida tropicalis* exposure and the immune response in food factory workers. *International journal of environmental research and public health*, 16(3), 341.

- Silva S. (2012). *Candida glabrata*, *Candida parapsilosis* y *Candida tropicalis*: biología, epidemiología, patogenicidad y resistencia antifúngica [Internet]. Fems Microbiology Reviews. [citado el 17 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://academic.oup.com/femsre/article/36/2/288/563981>
- Singh, J. S., Kalamdhad, A. S., & Vimal, S. (2021). Bio-remediation of organophosphorus pesticides: An overview. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 104743.
- Sugiyama, A., Yazaki, K., & Inoue, H. (2017). *Candida tropicalis* in the rhizosphere of maize enhances the uptake of phosphorus under drought stress conditions. *Plant and soil*, 410(1-2), 357-369.
- Wang, Y., Li, X., Li, Y., Huang, Q., Li, L., Wu, Y., & Wang, D. (2020). Health risk assessment of organophosphorus pesticides and heavy metals in agricultural products after bioremediation. *Ecotoxicology and environmental safety*, 193, 110355.
- Yurkov A. (2018). Levaduras del suelo: oscuras pero preciosas. NIH National Center for Biotechnology Information [Internet]. [citado el 17 de mayo de 2023]; Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1002/yea.3310>
- Zhang, H., Sun, Y., Xue, S., Shang, Y., Chen, X., & Yu, D. (2018). Biocontrol of Fusarium wilt of tomato with the endophytic fungus *Candida tropicalis* and its bioactive compound (2R)-1, 2, 3, 4-tetrahydro- β -carboline-2-one. *PloS one*, 13(3), e0194303.
- Zhang, L., Wang, J., Ma, Y., Zhang, X., Zhang, Y., & Huang, H. (2017). The endophytic fungus *Candida tropicalis* detoxifies cadmium in vitro and increases cadmium tolerance of host plants. *Microbial ecology*, 73(2), 497-508.