

**ESTUDIO COMPARATIVO DE ALTERNATIVAS DE FERTILIZANTES PARA LOS
CULTIVOS DE COLOMBIA A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE LA
BIOTECNOLOGÍA**

RUTH ELIANA HERNANDEZ HERNANDEZ

**MONOGRAFIA PARA OPTAR EL TÍTULO DE
ESPECIALISTA EN GESTIÓN AMBIENTAL**

ORIENTADOR

HARVEY ANDRES MILQUEZ SANABRIA

MsC INGENIERÍA QUÍMICA

PhD CIENCIAS-ENERGIAS RENOVABLES

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
ESPECIALIZACIÓN ES GESTIÓN AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C**

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre
Firma del director

Nombre
Firma del presidente Jurado

Nombre
Firma del jurado

Nombre
Firma del jurado

Bogotá D.C febrero de 2022

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano de la Facultad de Ingenierías

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Directora de la Especialización en Gestión Ambiental

Nubia Liliana Becerra Ospina

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer principalmente a Dios por darme la fuerza y sabiduría necesaria para terminar esta etapa de mi vida.

A mis padres Alirio y Anair que son mi orgullo y modelo a seguir; por siempre brindarme amor y cariño, apoyándome incondicionalmente en cada decisión tomada, acompañándome siempre en cada etapa de mi vida y por hacer también este y cada uno de mis sueños parte de sus vidas.

A mi hermana Karen por acompañarme siempre en las largas noches de trabajo y escucharme en los momentos difíciles durante este camino. Motivándome cada día a ser una mejor hermana.

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	9
INTRODUCCIÓN	10
OBJETIVOS	11
1. FERTILIZANTES DE SINTESIS QUIMICA	12
1.1 Función de los fertilizantes inorgánicos	12
1.2 Tipos de nutrientes que aportan los fertilizantes a las plantas.	13
1.2.1 <i>Macronutrientes</i>	13
1.2.2 <i>Micronutrientes</i>	15
1.3 Problemáticas ambientales	16
1.3.1 <i>Eutrofización</i>	16
1.3.2 <i>Degradación de suelos agrícolas</i>	18
1.3.3 <i>Contaminación de aguas subterráneas</i>	19
1.3.4 <i>Contaminación del aire</i>	20
1.4 Problemas en la salud humana	21
1.4.1 <i>Metahemoglobinemia</i>	22
1.4.2 <i>Nitrosaminas</i>	23
2. CARACTERIZACIÓN DE LOS TIPOS Y CANTIDAD DE FERTILIZANTES UTILIZADOS EN COLOMBIA	24
2.1 Importancia agrícola en Colombia	24
2.1.1 <i>Economía agropecuaria en Colombia</i>	25
2.2 Tipo y cantidad de fertilizantes utilizados en Colombia	27
2.2.1 <i>Caracterización de los tipos y cantidades de fertilizantes en Colombia</i>	27
2.3 Fertilizantes Inorgánicos	33
2.3.1 <i>Ventajas</i>	33

2.3.2 <i>Desventajas:</i>	33
2.3.3 <i>Tipos de fertilizantes inorgánicos</i>	33
2.4 Fertilizantes orgánicos	34
2.5 Fertilizantes orgánicos minerales	34
3. ALTERNATIVAS DE FERTILIZACION DE SUELOS	36
3.1 Fertilizantes orgánicos	36
3.1.1 <i>Ventajas y desventajas de fertilizantes orgánicos</i>	36
3.1.2 <i>Tipos de fertilizantes orgánicos</i>	37
3.2 Biofertilizantes a partir de microorganismos	43
3.2.1 <i>Microorganismos en el suelo</i>	43
3.2.2 <i>Hongos</i>	45
3.2.3 <i>Bacterias</i>	49
3.2.4 <i>Microalgas</i>	51
4. COMPARACIÓN DE LOS CASOS DE ÉXITO DE LA APLICACIÓN DE LA BIOTECNOLOGÍA	55
4.1 Inoculación con bacterias promotoras de crecimiento vegetal en tomate bajo condiciones de invernadero	55
4.2 Uso del hongo Trichoderma (Trichoderma sp) como biofertilizante en el cultivo de arroz (ORYZA SATIVA L.), comunidad “las gilces- crucita”	56
4.3 Eficacia de extractos de microalgas como bioestimulantes mediante tratamiento de semillas y aspersion foliar para el cultivo de tomate	57
4.4 Comparación de los resultados de los tres casos de éxito	58
5. CONCLUSIONES	63
BIBLIOGRAFÍA	65

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Comparación de crecimiento de raíces con y sin fertilización del suelo	12
Figura 2 Compuestos elementales en las plantas	14
Figura 3. Eutrofización por uso excesivo de fertilizantes químicos	17
Figura 4 Principios de Eutrofización	17
Figura 5 Comparación de suelo degradado con respecto a uno en óptimas condiciones	19
Figura 6 Proceso de lixiviación de nitratos	20
Figura 7 Reacciones del proceso de Haber Bosch	21
Figura 8 Consecuencia de los nitratos y nitritos en la sangre	22
Figura 9 Porcentaje PIB agropecuario en América Latina	25
Figura 10 PIB agropecuario de Colombia	26
Figura 11 Tipo y cantidad de fertilizantes registrados en el ICA para Colombia	28
Figura 12 Tipo de formulaciones en fertilizantes usados en Colombia	29
Figura 13 Cantidad de fertilizantes vendidos en Colombia en los años 2010-2019	30
Figura 14 Consumo de fertilizantes (kilogramos por hectárea de tierra cultivable)	31
Figura 15 Porcentaje de hectáreas cultivables en Colombia.	32
Figura 16 Fertilizante orgánico líquido fabricado por biodigestores	38
Figura 17 Humus de Lombriz	39
Figura 18 Compostaje	40
Figura 19 Economía circular del compostaje	41
Figura 20 <i>Hongos de tipo micorrizas utilizados como biofertilizante</i>	46
Figura 21 Esporocaps de hongos	47
Figura 22 Ectomicorrizas en las raíces de las plantas	48
Figura 23 Endomicorriza	49
Figura 24 Quistes formados por bacterias fijadoras de nitrógeno Azotobacter	51

RESUMEN

El uso de fertilizantes químicos es de gran importancia para suplir con las necesidades nutricionales como nitrógeno, fósforo y potasio para los cultivos; sin embargo, el uso desmedido de estos productos ocasiona diferentes problemáticas ambientales como la eutrofización; contaminación de aguas subterráneas; contaminación del aire y degradación del suelo. Así mismo se presentan problemáticas de salud en las personas que hacen uso de estos insumos agrícolas y en aquellas que consumen los productos que se desarrollaron con altos niveles de fertilización química, entre estas es la metahemoglobinemia y las nitrosaminas.

La presente monografía tuvo como objetivo principal evaluar los casos de éxito sobre la aplicación de la biotecnología como alternativa de fertilización para los cultivos de Colombia. En donde se realizó una caracterización del tipo, cantidad de fertilizantes y otros factores en los cultivos de Colombia, con el fin de evidenciar la situación del uso de estos productos químicos en los diferentes cultivos del país. Así mismo se evidencia las estrategias de fertilización, en las cuales se encuentra, los derivados de fertilizantes orgánicos como biol, compost, humuz de lombriz, entre otros; de igual forma se encuentra la biotecnología a partir del uso de microorganismos como Bacterias, Hongos y Microalgas en los biofertilizantes. Por último, se plantea un cuadro comparativo sobre tres casos de éxito, en los que se hace uso de los microorganismos en diferentes cultivos, el cual se obtuvieron resultados satisfactorios en cada uno de los casos de éxito a comparación de los tratamientos sin uso del microorganismo; sin embargo, las microalgas se caracterizaron por ser el microorganismo más completo para uso de fertilizantes, dado que aporta carbohidratos (40,90%), Proteínas (26,18%) y lípidos (27,20%) sirviendo como precursores de fitohormonas, brindándoles a las plantas protección contra el estrés abiótico. Así mismo, aumenta el crecimiento de las raíces y el número de hojas y brinda un porcentaje de carotenoides de 13,45 miligramos, por lo que aumenta la capacidad de las plantas en realizar fotosíntesis.

Palabras clave: Biotecnología, biofertilizantes, fertilizantes químicos, bacterias, hongos, microalgas.

INTRODUCCIÓN

Uno de los sectores más importantes para Colombia es la agricultura ya que por medio de esta se logra abastecer la canasta familiar de más de 50 millones de personas y de igual manera posee una gran influencia en la economía del país. Sin embargo, para los cultivos son necesarios el uso de diferentes insumos agrícolas, tales como los fertilizantes químicos, ya que poseen la capacidad de suplir con los requerimientos nutricionales del suelo; es decir la capacidad de aportar macronutrientes y micronutrientes, que beneficie el crecimiento y desarrollo de las plantas. Pero, con el paso de los años no se ha tenido un adecuado uso de estos productos químicos en los diferentes cultivos, haciendo que los suelos pierdan sus propios nutrientes y generando así diferentes problemáticas tanto ambientales como de salud humana.

Es por eso, que es importante conocer las nuevas alternativas de fertilizantes que sean más amigables con el medio ambiente y que cumplan con las necesidades nutricionales del suelo para un óptimo desarrollo de los cultivos. Una de las alternativas que se ha venido empleando e investigando es la aplicación de la biotecnología en fertilizantes, que hace referencia al uso de microorganismos tales como bacterias, hongos y microalgas capaces de aportar nutrientes esenciales como el nitrógeno, fósforo y potasio a los suelos agrícolas.

Por consiguiente, en la presente monografía se presenta de manera más detallada las problemáticas ambientales y de salud que ocasiona el uso irrazonable de los fertilizantes químicos, la caracterización del tipo y cantidad de estos productos usados en Colombia, una descripción detallada de las alternativas de uso de fertilización y por ultimo una comparación de los casos de éxito sobre la aplicación de la biotecnología en fertilizantes; es decir, la determinación del tipo de microorganismo más adecuado para reemplazar los fertilizantes de síntesis química.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar los casos de éxito sobre la aplicación de la biotecnología en fertilizantes como alternativa de uso en los cultivos de Colombia.

Objetivos específicos

1. Identificar la problemática ambiental y de salud causados por el uso de fertilizantes de síntesis química.
2. Caracterizar la cantidad y el tipo de fertilizantes utilizados en Colombia.
3. Describir las posibles alternativas usadas para la fertilización de los cultivos.
4. Comparar los casos de éxito sobre la aplicación de la biotecnología en fertilizantes.

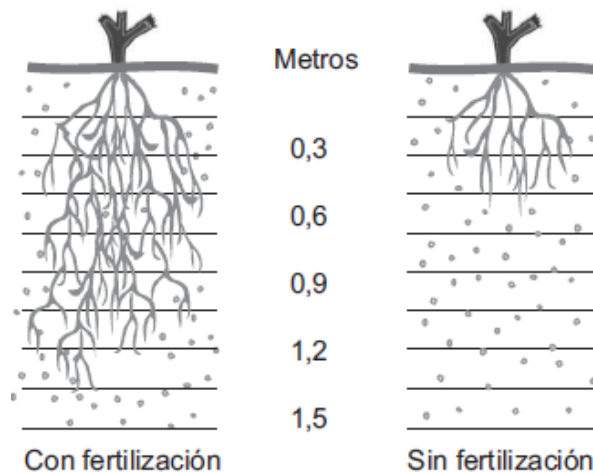
1. FERTILIZANTES DE SINTESIS QUIMICA

En este capítulo se presentará una descripción acerca de los fertilizantes de síntesis química, en donde empieza principalmente por la descripción de los tipos de nutrientes necesarios en las plantas, la función que cumplen los fertilizantes para lograr aportar dichos nutrientes al suelo y las problemáticas ambientales y de salud que ocasiona el uso de estos productos agrícolas.

1.1 Función de los fertilizantes inorgánicos

Los fertilizantes inorgánicos o de síntesis química tienen la función de aportar a los suelos nutrientes necesarios para el crecimiento y desarrollo de las plantas, esto se hace con el fin de solventar la deficiencia de estos compuestos y aumentar así el rendimiento de los cultivos (FAO, 2002). Cabe resaltar que al no aplicar fertilizantes en los suelos los rendimientos son más bajos, ya que al paso de los años la extracción de estos compuestos para los diferentes ciclos de producción. Lo expuesto anteriormente, se puede observar en la figura 1:

Figura 1.
Comparación de crecimiento de raíces con y sin fertilización del suelo



Nota. Profundidad de las raíces de las plantas con y sin fertilización. Tomado de: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación -FAO-. (s.f). Los fertilizantes y su uso. <https://www.fao.org/3/x4781s/x4781s.pdf>,

En la figura 1 es evidente que el crecimiento de las raíces de las plantas al aplicar fertilizantes es mayor a comparación de aquellas a las cuales no se les aplica estos insumos en el suelo. Este comportamiento es dado gracias a la presencia de nutrientes en la tierra, donde a mayor cantidad de estos compuestos mayor es el crecimiento de las raíces y por ende de las plantas. Por lo tanto, con el paso de los años es necesario el uso de estos productos químicos para cumplir con la necesidad agrícola.

La eficiencia de un fertilizante va encaminada con respecto a dos puntos, el primero es sobre el rendimiento del cultivo determinado; es decir, que tanto puede incrementar el rendimiento por cada kilogramo de nutriente aplicado dentro de un mismo sistema de cultivo y el segundo está relacionado con la eficiencia de recuperación, la cual indica la cantidad de aprovechamiento del nutriente por planta de la dosis aplicada inicialmente (Fertilab, s.f).

1.2 Tipos de nutrientes que aportan los fertilizantes a las plantas

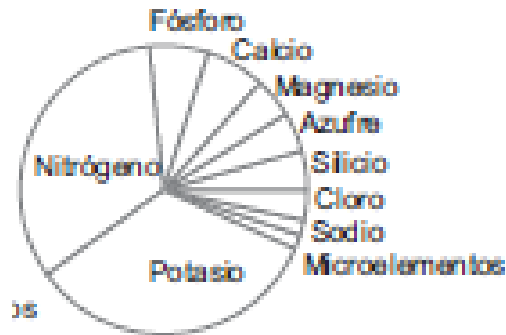
Los fertilizantes son compuestos tanto químicos como orgánicos que ayudan a resolver deficiencias de macronutrientes en los suelos. Pero para poder entender mejor el funcionamiento de los fertilizantes en los cultivos se debe conocer los tipos de macronutrientes y micronutrientes que son necesarios para fortalecer el crecimiento de las plantas:

1.2.1 *Macronutrientes*

Este tipo de nutrientes se necesitan en mayor proporción y se tienen que aplicar en grandes cantidades si el suelo es deficiente en algunos de ellos, esta deficiencia puede ocurrir específicamente por la extracción natural de los nutrientes por las actividades agrícolas durante largos años (FAO, 2002). Dentro de los macronutrientes, se encuentran tres tipos que son los más esenciales para el crecimiento de las plantas como se puede observar en la figura 2:

Figura 2

Compuestos elementales en las plantas



Nota. Composición elemental media de las plantas. Tomado de: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación – FAO-. (s.f). Los fertilizantes y su uso. <https://www.fao.org/3/x4781s/x4781s.pdf>

De acuerdo con el diagrama anterior los compuestos con mayor necesidad en las plantas son los denominados **nutrientes primarios** tales como Nitrógeno, Fósforo y Potasio.

- a) *Nitrógeno (N)*: es el compuesto principal para el crecimiento de las plantas, supone de uno a cuatro por ciento de su extracto seco. “El nitrógeno es absorbido del suelo en forma del anión nitrato (NO_3^-) o de amonio (NH_4^+)” (FAO, 2002), después del proceso de absorción, este compuesto se combina con otros componentes producidos por el metabolismo de carbohidratos, con el fin de formar aminoácidos y proteínas necesarias para el desarrollo y rendimiento de la planta. Así mismo la adición de nitrógeno al suelo es esencial e importante para que se logre dar la absorción de otros nutrientes secundarios que al igual del nitrógeno cumplen su función para el crecimiento de las plantas.
- b) *Fósforo (P)*: este compuesto tiene un papel importante en la transferencia de energía, ya que es esencial para los procesos de fotosíntesis y químico-fisiológicos de las plantas. De igual manera, es importante para el desarrollo de los tejidos que forman puntos de crecimiento de dichas plantas; sin embargo, este compuesto es deficiente en los suelos agrícolas y por ende es necesaria su adición.

c) *Potasio (K)*: permite la activación de más de 60 enzimas en los procesos de síntesis de carbohidratos y proteínas, favoreciendo el crecimiento de las plantas. También contribuye a la mejora del régimen hídrico, lo que permite un aumento en la tolerancia de las sequías, heladas y salinidad, evitando que las plantas se enfermen durante su desarrollo (FAO, 2002).

Otros macronutrientes necesarios para las plantas son los denominados ***nutrientes secundarios***, dentro de los cuales se encuentran:

a) *Magnesio (Mg)*: en la clorofila, este compuesto es necesario para aportar el pigmento verde característico del color de las plantas, el cual funciona como un aceptador de energía solar. Así mismo el magnesio contribuye en cierta parte a la transferencia energética de la planta (FAO, 2002).

b) *Azufre (S)*: contribuye a los procesos de proteínas y a la formación de clorofila igual que el magnesio, en la mayoría de las plantas suple del 0.2 al 0.3 por ciento en base de su extracto seco (FAO, 2002).

c) *Calcio (Ca)*: es uno de los nutrientes esenciales para el crecimiento de las raíces, ayudándolas a fortalecer y brindando a la planta buen soporte de crecimiento, también es un constituyente del tejido celular de las membranas (FAO, 2002).

1.2.2 Micronutrientes

Estas sustancias presentan la misma importancia que los macronutrientes para el crecimiento de las plantas; sin embargo, ellas absorben un menor porcentaje, su función principal es aportar nutrientes como el Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Zinc (Zn) y Boro (B) a las plantas (FAO, 2002).

1.3 Problemáticas ambientales

Como se ha evidenciado anteriormente, el uso de fertilizantes minerales es esencial en la agricultura convencional, dado que permite un mayor rendimiento en los cultivos. Sin embargo, el uso excesivo de estos productos químicos ha producido problemáticas ambientales como la eutrofización, toxicidad de las aguas, contaminación de aguas subterráneas, contaminación del aire, degradación del suelo y de los ecosistemas, desequilibrios biológicos y reducción de la biodiversidad.

1.3.1 Eutrofización

Es el enriquecimiento de las aguas superficiales con nutrientes para las plantas, viene relacionado con el estado trófico que hace referencia al estado de nutrientes en un lago y el crecimiento de la materia orgánica en el mismo, así que la eutrofización es el proceso de cambio de este estado trófico a un nivel superior de adición de nutrientes (González, 2019). Es aquí donde la agricultura es uno de los principales causantes de esta problemática ambiental, dado que, a la aportación de nutrientes en el suelo por medio de los fertilizantes, como nitrógeno, fósforo y potasio, ocasionando el crecimiento excesivo de algas, que impiden un equilibrio biológico de forma correcta. Las causas de esta problemática son las siguientes:

1. Aumento de la producción y biomasa de fitoplancton, entre otras algas asociadas:

Un claro ejemplo de la producción de fitoplancton es en uno de los lagos de Colombia que es el buchón de agua de Hidroituango, como se puede evidenciar en la figura 3 esta problemática cubre todo el cuerpo de agua, impidiendo la oxigenación de la vida acuática y demás factores. Mientras que en la figura 4 se observa los inicios de esta problemática en las fuentes de agua.

Figura 3.

Eutrofización por uso excesivo de fertilizantes químicos



Nota. Eutrofización en el buchón de hidroituango. Tomado de: *Movimientos Ríos vivos* (2019). El buchón de agua en hidroituango es el síntoma no la enfermedad <https://riosvivoscolombia.org/el-buchon-de-agua-en-hidroituango-es-el-sintoma-no-la-enfermedad/>

Figura 4

Principios de Eutrofización



Nota. La imagen muestra los inicios de eutrofización en uno de los lagos de Colombia. Tomado de: *En Colombia*. Eutrofización. (s.f). <https://encolombia.com/medio-ambiente/interesa/eutrofizacion/>

Como se puede observar en las figuras 3 y 4, la eutrofización es una de las problemáticas ambientales más severas, ocasionando afectaciones tanto para la salud humana como para la vida acuática.

2. Modificación de las características del hábitat debida a la transformación del conjunto de plantas acuáticas (González, 2019).
3. Producción de toxinas por la presencia de las algas (González, 2019).
4. Reducción de la posibilidad de uso del agua para fines recreativos por la infestación de malas hierbas, olores molestos producidos por la descomposición de las algas y presencia de lodos (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación -FAO-, 1997).

1.3.2 Degradación de suelos agrícolas

El suelo es la capa superficial de la tierra, que ha sido transformada de forma muy lenta por tres acciones, la primera es la acción meteorológica que hace referencia a la interacción de la atmosfera con los subsistemas, es decir la transferencia horizontal de cualquier partícula por medio del movimiento del aire, como la advección del calor y la humedad. La segunda es la acción de la vegetación y la tercera es la acción del ser humano. En la agricultura el suelo les brinda soporte a las plantas por medio de una capa permeable para las raíces y un depósito para los nutrientes y agua que dichas plantas requieren para su crecimiento (FAO, 2002). Sin embargo el inadecuado uso de fertilizantes ha conllevado a la degradación del suelo, que implica una pérdida de equilibrio en sus propiedades, limitando su productividad, ya que existe un déficit de nutrientes, acidez, salinidad, deficiencia de materia orgánica, entre otros (Sánchez G. C., 2013). Cuando no hay presencia de nutrientes y demás propiedades en el suelo, este puede verse en la figura 5:

Figura 5

Comparación de suelo degradado con respecto a uno en óptimas condiciones



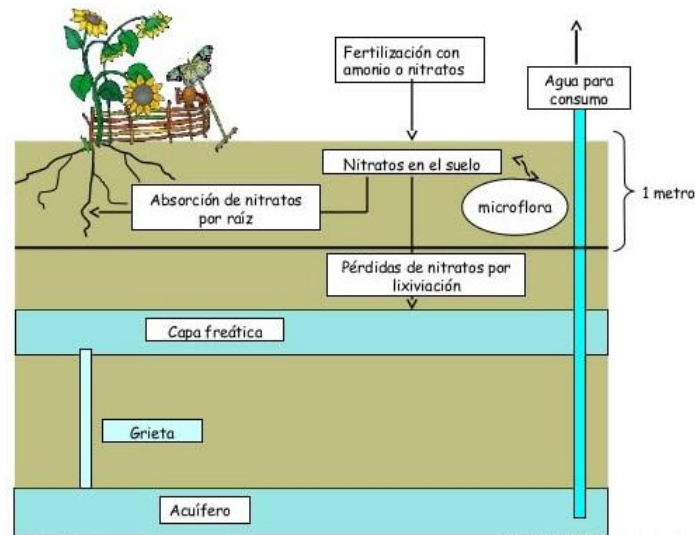
Nota. En la imagen se muestra una comparación del suelo cuando no posee nutrientes (izquierda), con respecto a aquel que se encuentra en buenas condiciones, Tomado de: Gestión (2020). ¿Podría el suelo contener la respuesta a la escasez de alimentos? <https://gestion.pe/mundo/podria-el-suelo-contener-la-respuesta-a-la-escasez-de-alimentos-degradacion-del-suelo-noticia/>

1.3.3 Contaminación de aguas subterráneas

En la agricultura las plantas absorben una pequeña parte de nitrógeno agregado a los suelos mediante fertilizantes nitrogenados; mientras que la mayor concentración de este compuesto es dispersada por las fuertes lluvias y demás movimientos de aguas en la zona, lo que implica un impacto ambiental en el recurso hídrico por la lixiviación de los nitratos. La consecuencia de este fenómeno es dada principalmente por el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados, el cual al aplicar dichos productos se forma un anión NO_3 que no es retenido por la tierra, pero es fácilmente transportado por el agua, facilitando su desplazamiento por fuera de las raíces de las plantas (González, 2019)., este proceso se puede observar más detalladamente en la figura 6:

Figura 6

Proceso de lixiviación de nitratos



Nota. La imagen muestra el proceso de lixiviación de nitratos y la contaminación que esto genera en los recursos por el uso de fertilizantes químicos. Tomado de: Informaciones agronomicas, (2012). Lixiviación de nutrientes del suelo, <https://agronoticias2012.blogspot.com/2016/12/lixiviacion-de-nutrientes-del-suelo.html>

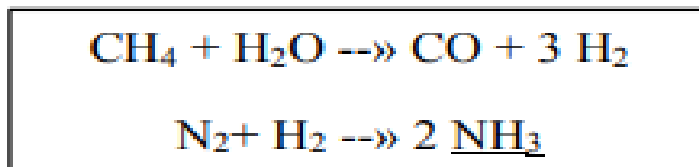
1.3.4 Contaminación del aire

Cuando se aplican los fertilizantes nitrogenados en los cultivos, una parte de este compuesto se pierde en la atmosfera en forma de amoniaco, lo que ocasiona partículas PM2.5 que hace referencia al material particulado que tienen 2.5 micrómetros de diámetro, afectando tanto la salud humana como el estado del aire. Así mismo, el uso de estos insumos agrícolas genera óxido nitroso (N_2O), clasificado como uno de los gases de efecto invernadero con mayor relevancia en el sector agropecuario, ya que “posee hasta 300 veces el efecto del calentamiento del dióxido de carbono” (Asociación Geoinnova , 2016).

Los fertilizantes nitrogenados de síntesis (nitrato amónico-cálcico, nitrato amónico, nitro sulfato amónico, sulfato amónico, entre otros), se obtienen a partir de amoniaco como base, por medio del proceso de Haber Bosch en la figura 7:

Figura 7

Reacciones del proceso de Haber Bosch



Nota. La imagen muestra las reacciones correspondientes a la síntesis de fertilizantes nitrogenados, a partir de amoniaco por el proceso de Haber Bosch. Tomado de: Facultad de farmacia Universidad de Complutense, (2017). Problemas ambientales y de salud derivados del uso de fertilizantes nitrogenados.

<http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/CRISTINA%20VEGA%20OLIVA.pdf>

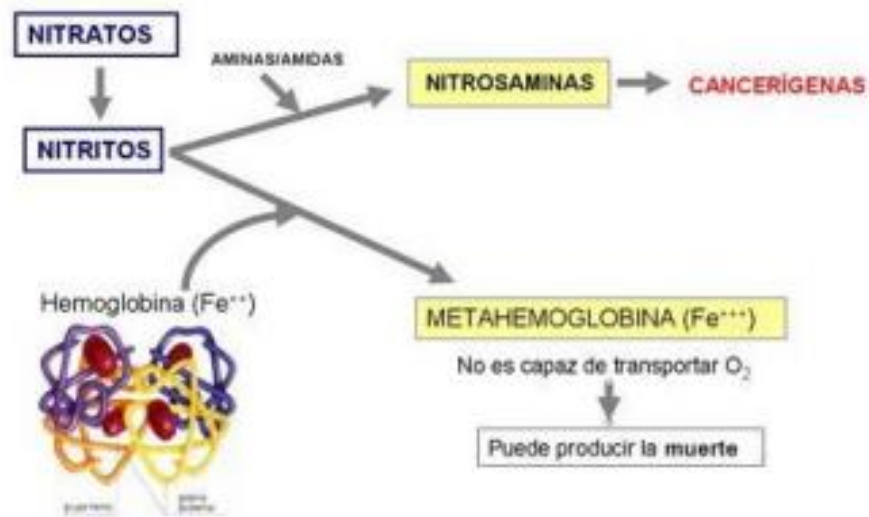
El 60% del nitrógeno aplicado a los cultivos proviene de dicho proceso industrial. Del 10 al 40% de este compuesto es asimilado por el cultivo, mientras que el restantes es exportado a la atmosfera, generando el ozono troposférico y favoreciendo el efecto invernadero (Oliva, 2017)

1.4 Problemas en la salud humana

Una de las problemáticas en la salud humana por el uso de fertilizantes químicos nitrogenados es la reducción de oxígeno que se transporta por la sangre, como consecuencia de la metahemoglobina que se forma por los nitratos presentes en el agua por el proceso de lixiviación. En la figura 8 se puede evidenciar las enfermedades que ocasiona los fertilizantes nitrogenados por medio de la transformación de nitratos a nitritos:

Figura 8

Consecuencia de los nitratos y nitritos en la sangre



Nota. La imagen muestra el ciclo de la transformación de los nitratos a nitritos y las enfermedades que esto ocasiona en el cuerpo humano. Tomado de: Facultad de farmacia Universidad de Complutense, (2017). Problemas ambientales y de salud derivados del uso de fertilizantes nitrogenados. <http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/CRISTINA%20VEGA%20OLIVA.pdf>

Según la anterior imagen, la presencia de nitritos en la sangre hace que la hemoglobina se convierta en metahemoglobina, impidiendo así el transporte de oxígeno y con probabilidad de producir la muerte. De igual manera «los nitritos convierten las aminas en nitrosaminas, siendo estas últimas cancerígenas para el cuerpo humano» (Oliva, 2017) .

1.4.1 Metahemoglobinemia

Esta enfermedad se define como la presencia de altos niveles de metahemoglobina en la sangre, en donde la forma ferrosa (Fe⁺²) del grupo hemo es oxidada a forma férrica (Fe⁺³), impidiendo el adecuado transporte de oxígeno al cuerpo humano, sin embargo, existen ciertas enzimas que se encargan de reducir dicha presencia. Pero la metahemoglobina se presenta con mayor frecuencia en los niños, dado que en su

sistema inmunológico no poseen la misma cantidad de estas enzimas a comparación de un cuerpo humano adulto. Generalmente esta enfermedad se adquiere por la ingesta de sustancias con alto contenido en nitratos, como el agua contaminada por estos compuestos a causa de fertilizantes químicos y la contaminación de vegetales por dichos nitratos (Ventura et al., 2019).

1.4.2 Nitrosaminas

Estos compuestos se forman cuando los nitratos se juntan con las aminas, específicamente esto ocurre cuando se cocinan los alimentos proteínicos que poseen nitratos o nitritos y por el consumo de agua con pequeñas cantidades de nitratos que son atribuidos por el uso de fertilizantes nitrogenados y contaminación por estiércol (Walter, 2019). Así mismo es importante recalcar que la presencia de estos compuestos en el cuerpo humano, contribuyen al desarrollo de cáncer de estómago y faringe.

El nitrato (NO_3^-) presente en las fuentes contaminantes por fertilizantes, es reducido a nitrato (NO_2^-) por las bacterias de la saliva y también en el estómago. El 25% de los nitratos ingeridos recircula en la saliva, mientras que el 20% es convertido en nitrito. En el estómago, el 20% de los nitritos proviene de los alimentos y el 80% restante proviene de la reducción del nitrato en la saliva, la formación de los nitritos a partir de nitratos se realiza en el estómago y aumenta cuando incrementa el pH, lo que ocurre circunstancias específicas, como la gastritis crónica, los nitritos pueden oxidarse en el estómago a agentes nitrosantes y reaccionar con aminas secundarias para formar N-nitrosocompuestos (Jakszyn, 2006).

La presencia de fosfatos en las aguas subterráneas por el uso excesivo de fertilizantes puede proliferar bacterias llamadas como cianobacterias, que pueden producir toxinas de alto riesgo para la salud, provocando enfermedades nerviosas como Alzheimer (Biofabrica , 2014).

2. CARACTERIZACIÓN DE LOS TIPOS Y CANTIDAD DE FERTILIZANTES UTILIZADOS EN COLOMBIA

En este capítulo se abarcará la importancia de la actividad agrícola para la parte económica y alimenticia de Colombia, así mismo se incluirá graficas que representen la cantidad y tipos de fertilizantes más vendidos en el país, el consumo en kilogramos de fertilizante por hectárea de tierra cultivable, el porcentaje de hectáreas que tiene el país desde el año 2010 al 2018 y por ultimo las principales características de los tipos de fertilizantes más usados en el país según el registro del ICA.

2.1 Importancia agrícola en Colombia

Desde hace tiempo atrás, la agricultura se ha definido como la producción, comercialización, abastecimiento de cultivos y productos de ganado, siendo esta la columna vertebral del sistema económico de muchas naciones, lo que contribuye al progreso y crecimiento de los sectores social y económico. Es por eso que para todos los países la agricultura tiene una gran importancia en su economía, gracias a la producción interna, empleo, ingresos de exportación, desarrollo rural y seguridad alimentaria.

En Colombia, la agricultura es uno de los sectores principales que mueve el país y según la organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura (FAO), puede convertirse en una de las grandes despensas del mundo, ya que es uno de los siete países de Latinoamérica que posee un gran potencial para el desarrollo de áreas cultivables (DVA, 2021).

El sector agrícola en Colombia tiene perspectivas de crecimiento positivas por tres factores: el primero es el incremento en la demanda mundial de alimentos que se conjuga con las condiciones climáticas de Colombia, permitiendo el aumento sostenido de la oferta agropecuaria, la segunda es el alto crecimiento que tiene el sector agrícola con

respecto a otros factores de la economía y la tercera es el incremento del gasto por parte del gobierno nacional al sector agropecuario.

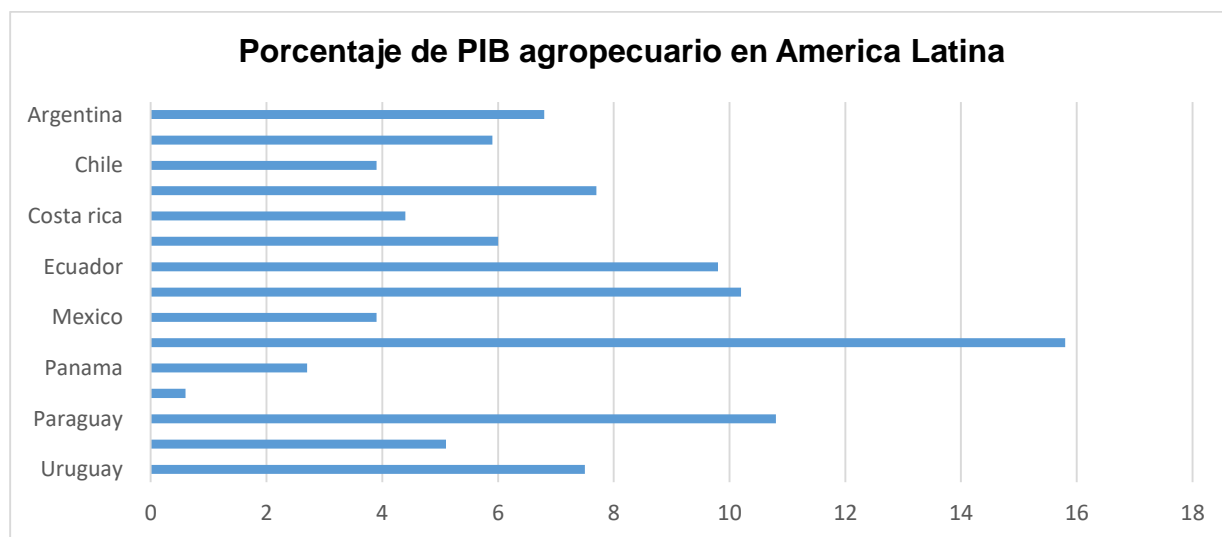
Colombia tiene a favor factores climáticos que favorecen el desarrollo de sistemas productivos continuos; es decir una producción durante todo el año. Además, cuenta con una oferta importante de recursos naturales como agua y biodiversidad que contribuyen a la producción agrícola. Cabe resaltar que en Colombia la actividad agrícola no está constituida solamente por el abastecimiento de alimentos a la población, sino que también abarca el desarrollo de productos como flores, café, aceite de palma, azúcar, panela, banano, cacao, frutas, carne de bovinos, entre otros (DVA, 2021).

2.1.1 Economía agropecuaria en Colombia

Para empezar a analizar la economía agropecuaria colombiana, es necesario identificar la posición que tiene el país con respecto al porcentaje PIB en Latinoamérica, con respecto a los datos suministrados por el grupo banco mundial de desarrollo del año 2020, evidenciado en la figura 9:

Figura 9

Porcentaje PIB agropecuario en América Latina



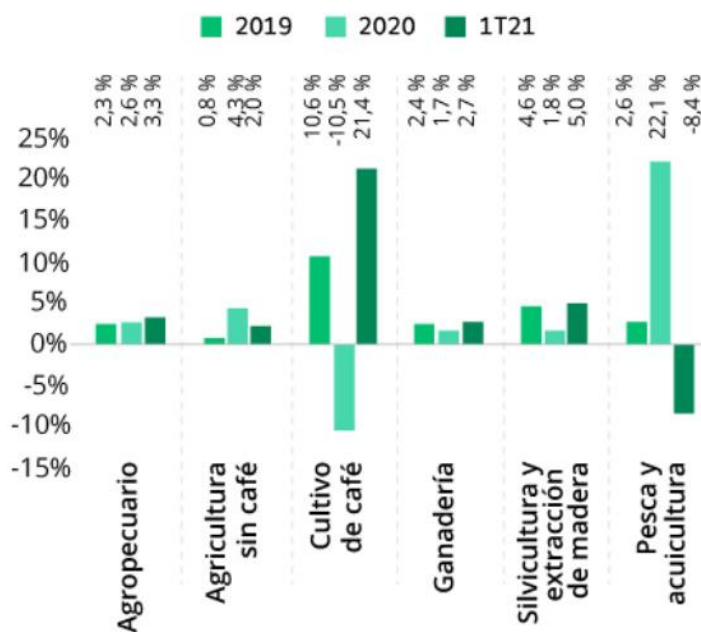
Nota. En la gráfica se observa el porcentaje de participación de la agricultura en el PIB en Latinoamérica para el año 2020. Grupo Banco Mundial de Desarrollo.

Según la gráfica anterior, se observa que Colombia es el cuarto país con uno de los porcentajes de PIB agropecuario más altos, con un valor de 7.7% por debajo de Guatemala y Ecuador. Esto significa que el país posee una alta posición de la economía en la agricultura, siendo esto uno de los factores más influyentes para que en el país cada vez se tenga una mayor actividad agrícola.

Para el año 2021, el DANE analizó el PIB agropecuario para Colombia, en donde se presentó un incremento del 3.3% durante el primer trimestre de 2021 (DANE, 2021), específicamente se muestra la variación del porcentaje del producto interno bruto desde el año 2019 hasta el primer trimestre del 2021 de las actividades más primordiales para la economía de Colombia, lo anterior se evidencia en la figura 10.

Figura 10

PIB agropecuario de Colombia



Nota. Esta figura muestra el cambio de Precio Interno Bruto (PIB) agropecuario en Colombia para los años 2019, 2020 y 2021. Tomado de: DANE (2021), Radiografía del sector agropecuario en el segundo trimestre del 2021. <https://www.grupobancolombia.com/wps/portal/empresas/capital-inteligente/actualidad-economica-sectorial/informe-sector-agropecuario-segundo-trimestre-2021>

Así mismo, se puede evidenciar que el PIB del sector agropecuario incremento del 2.3% al 3.3% desde el año 2019 al primer trimestre del 2021, además se observa un incremento significativo del PIB para el cultivo del café, en donde aumenta de un 10.6% a 21.4% siendo el sector más relevante para la economía de Colombia, es por eso que cada vez se hace más uso de fertilizantes con el fin de cumplir con dicha demanda económica del país. De igual manera, es importante recalcar que la actividad ganadera también presenta un aumento del 2.4% al 2.7%.

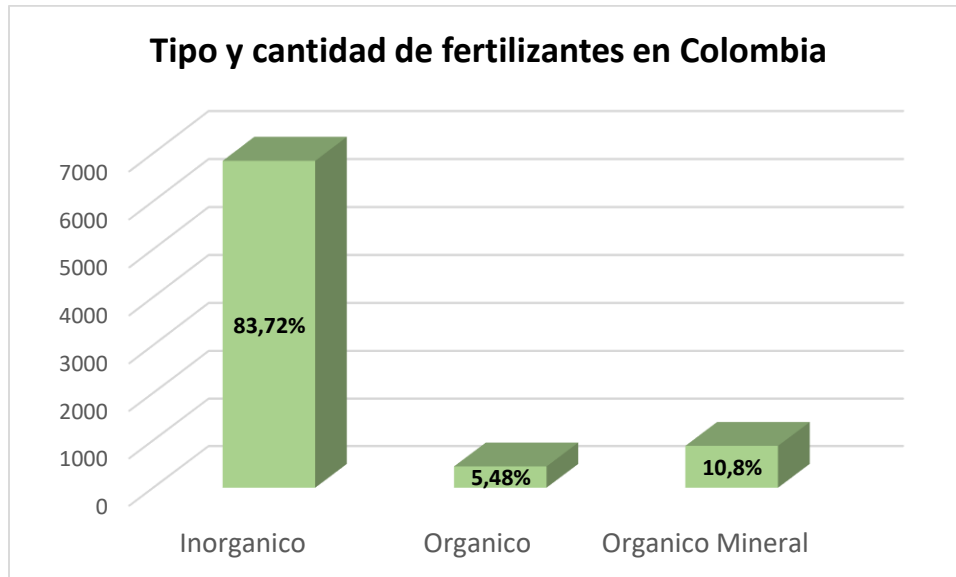
2.2 Tipo y cantidad de fertilizantes utilizados en Colombia

2.2.1 *Caracterización de los tipos y cantidades de fertilizantes en Colombia*

Al ser Colombia uno de los países con mayor actividad agrícola, se debe tener en cuenta el consumo de los insumos agrícolas que permiten cumplir con los diferentes requerimientos, uno de estos productos y con mayor uso en los cultivos son los fertilizantes ya que aportan nutrientes necesarios al suelo para lograr satisfacer la demanda alimenticia. Es por eso, que a continuación se presenta un análisis sobre el consumo de los fertilizantes en Colombia y esto mediante las siguientes figuras: primero se encuentra la figura 11 que corresponde a los tipos y cantidades de fertilizantes que son utilizados en Colombia, después esta la figura 12 que muestra el porcentaje de los tipos de formulaciones de fertilizantes más usados en el país, la figura 13 en donde se evidencia la cantidad de fertilizantes vendidos desde el año 2010 al 2019, en la figura 14 se encuentra el consumo en kilogramos de fertilizantes por hectárea de tierra cultivable y por último la figura 15 con los porcentajes de hectáreas cultivables en Colombia, las anteriores cuentan con su respectiva caracterización.

Figura 11

Tipo y cantidad de fertilizantes registrados en el ICA para Colombia

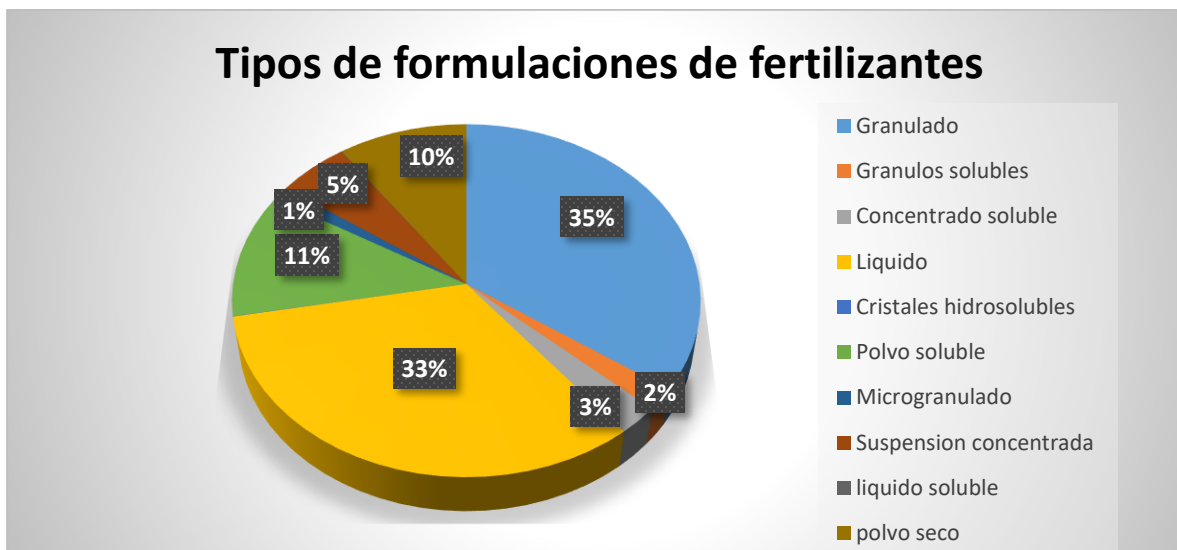


Nota. Comparación de los tipos de fertilizantes utilizados en Colombia para agosto 2021. ICA.

Según el instituto agropecuario colombiano (ICA) para el mes de agosto del 2021 se registraron tres tipos de fertilizantes que son vendidos en Colombia para suplir con las necesidades agrícolas evidenciados en la figura 11, dentro de ellos están los inorgánicos, orgánicos y orgánicos minerales, el cual los inorgánicos presenta una mayor participación para los cultivos con un porcentaje de 83,72%, el siguiente son los orgánicos minerales con un 10,8% y por ultimo están los orgánicos con una participación mínima de 5,48%, para un total de 8170 fertilizantes registrados. Es importante recalcar que los fertilizantes de tipo inorgánico son más usados por los agricultores en los diferentes cultivos, ya que por medio de estos se suplen los nutrientes de manera rápida y eficaz, pero al ser uno de los tipos con mayor uso agrícola, se producen mayores afectaciones al medio ambiente y a las personas nombradas en el primer capítulo de la presente monografía.

Figura 12

Tipo de formulaciones en fertilizantes usados en Colombia



Nota. Porcentaje de los tipos de formulaciones de fertilizantes registrados en el ICA para el año 2019.

Es importante analizar el tipo de formulaciones de fertilizantes más utilizados por los agricultores en Colombia, en donde se tiene en cuenta la capacidad de degradación que tienen estos productos; es decir si la sustancia es soluble en el agua o permanece más tiempo en el suelo al ser aplicados. De acuerdo con el registro del ICA sobre fertilizantes para agosto 2021, los tipos de formulaciones de estos insumos agrícolas con mayor relevancia que se encuentran en Colombia son: Granulado con un porcentaje del 35%, liquido con 33% y polvo soluble con 11%. Así mismo, existen otros tipos que son gránulos solubles (2%), concentrado soluble (3%), micro granulado (1%), suspensión concentrada (5%), polvo seco (10%) y por último cristales hidrosolubles.

Figura 13

Cantidad de fertilizantes vendidos en Colombia en los años 2010-2019



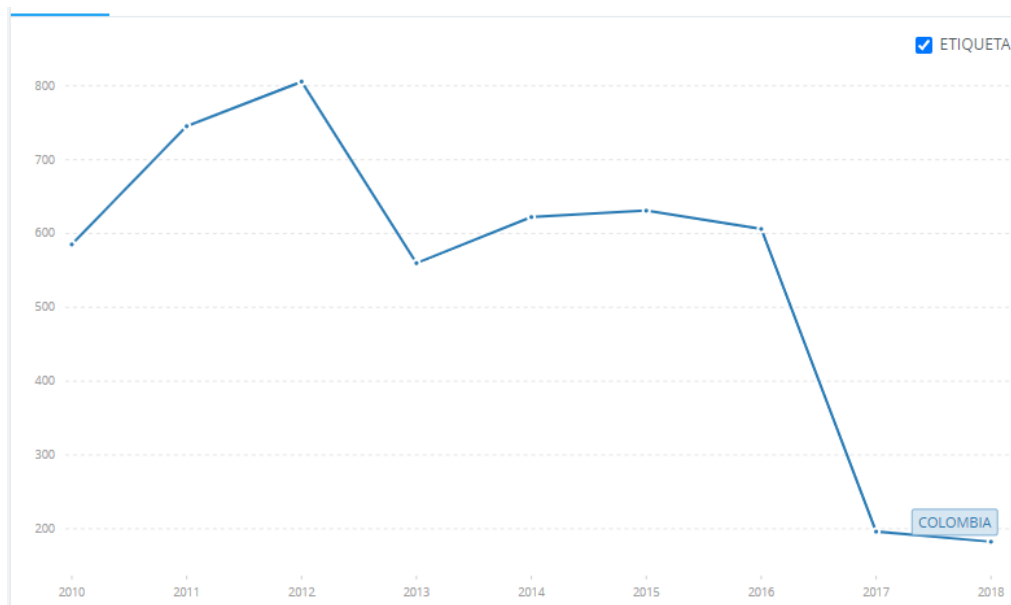
Nota. Esta figura muestra la variación de ventas de fertilizantes en Colombia desde el año 2010 hasta el 2019, aportados por el ICA.

Según la figura 13, se puede observar el comportamiento de la cantidad de fertilizantes utilizados en Colombia, esto por medio del registro del ICA desde el año 2010 hasta el 2019, el cual se presenta un incremento significativo en el año 2016 con un total de 2.578.746 toneladas de fertilizantes usados para el sector agrícola. El comportamiento en general del consumo de fertilizantes en Colombia ha venido incrementando desde los últimos diez años, lo que significa que cada vez surge la necesidad de cumplir los requerimientos nutricionales del suelo para un óptimo crecimiento y desarrollo de las plantas en la agricultura; sin embargo, en el periodo anual del 2017 al 2019 se observa una caída exponencial poco significativa en el consumo de estos insumos agrícolas. En el año del 2016 al 2017 se tiene una disminución en las ventas de fertilizantes ya que en este periodo se presentó una baja de precios de los productos agrícolas, lo cual obligo a los cultivadores reducir el consumo de algunos insumos como los fertilizantes.

Así mismo, es importante tener en cuenta el consumo de fertilizantes que se presenta en Colombia, para esto se muestra la siguiente gráfica:

Figura 14

Consumo de fertilizantes (kilogramos por hectárea de tierra cultivable)



Nota. Esta imagen muestra el consumo de fertilizantes en Colombia desde el año 2010 al 2018, valores que se dan en kilogramos por hectárea cultivable. Banco mundial de desarrollo, Tomado de: Banco mundial de desarrollo, (2010-2018). Consumo de fertilizantes (kilogramos por hectáreas de tierra)-Colombia <https://datos.bancomundial.org/indicador/AG.CON.FERT.ZS?end=2018&locations=C> [O&start=2010](https://datos.bancomundial.org/indicador/AG.CON.FERT.ZS?end=2018&locations=C)

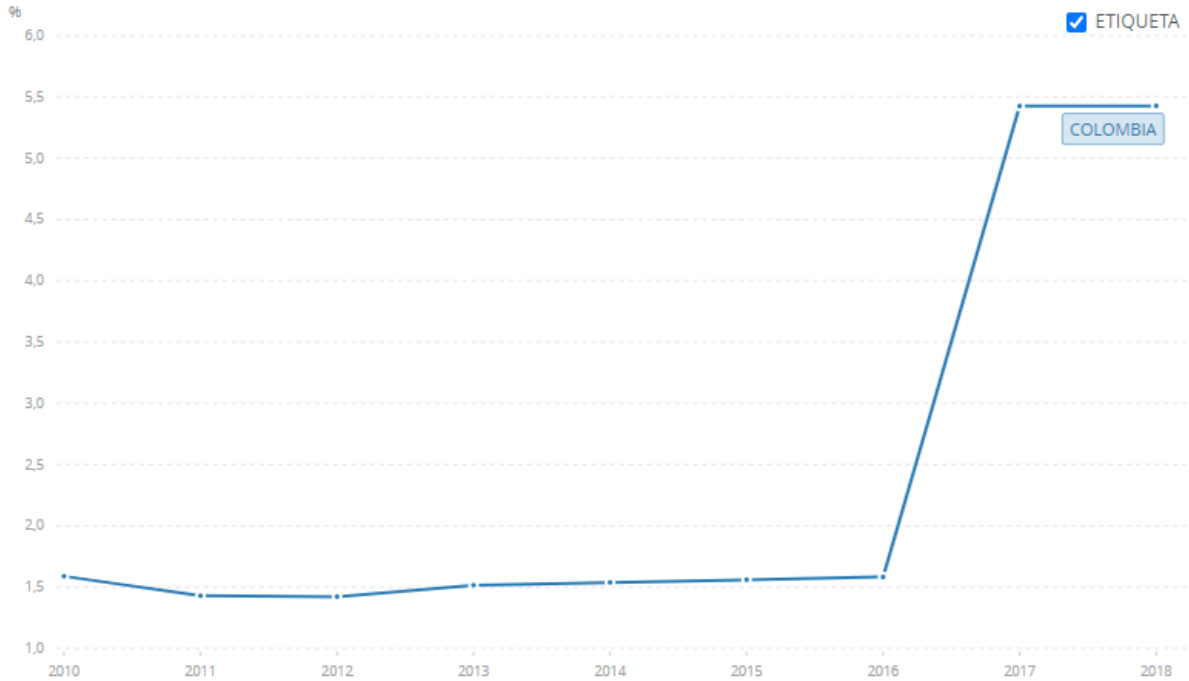
Para la comparación anual desde el año 2010-2018, el consumo de fertilizantes viene dado en kilogramos por hectárea de tierra cultivable suministrado por el banco mundial de desarrollo. Siendo el año 2012 con mayor consumo de estos insumos, específicamente de 805791 kilogramos, mientras que en el año 2018 presento un valor inferior con 182436 kilogramos, lo que presenta una variación de estos datos anualmente; sin embargo, el consumo de estos productos químicos sigue persistiendo por la necesidad nutricional que presentan los suelos agrícolas para cumplir con las necesidades económicas y alimentarias del país.

Continuando con el anterior análisis, es importante resaltar el porcentaje de hectáreas cultivables que presenta el país y a las cuales se hacen uso de productos agrícolas como los fertilizantes para satisfacer los requisitos nutricionales que presentan los suelos, es

por eso que a continuación se incluye una gráfica de dicha variable dentro de los años 2010-2018:

Figura 15

Porcentaje de hectáreas cultivables en Colombia.



Nota. En esta imagen se puede observar la variación del porcentaje de hectáreas cultivables que posee Colombia para el periodo anual del 2010 al 2018. Tomado de: Banco Mundial de Desarrollo (2010-2018). Tierras cultivables (% de área de tierra)-Colombia. <https://datos.bancomundial.org/indicador/AG.LND.ARBL.ZS?end=2018&locations=CO&start=2010>

Con respecto a la anterior gráfica, se puede evidenciar que el porcentaje de hectáreas de tierras cultivables en Colombia presentó un incremento significativo en el año 2017, pasando de 1.5% a 5.4%, lo que significa que la actividad agrícola va creciendo cada vez más, dado que es uno de los sectores con mayor importancia en la economía y canasta familiar de los habitantes del país. Sin embargo, en la gráfica 14 se evidencia que para el año 2017 al 2018 el consumo de fertilizantes es menor, lo que quiere decir que se ha venido implementado nuevas alternativas de fertilización en los cultivos, pero no es suficiente ya que aún se presentan valores altos de ventas de fertilizantes inorgánicos.

Por otro lado, es importante caracterizar los tipos de fertilizantes (Inorgánicos, orgánicos y orgánico-mineral) que son utilizados en Colombia, según el registro del ICA, evidenciado en la gráfica 11.

2.3 Fertilizantes Inorgánicos

Los fertilizantes inorgánicos son aquellos que están fabricados artificialmente, el cual su composición es de minerales sintéticos, generalmente de hidrocarburos o gas natural. Este tipo de productos químicos son ricos en nitrógeno, fósforo y potasio; sin embargo, poseen otros compuestos tales como nitrato de amonio, sulfato de amonio, cloruro de potasio, superfosfato triple y sulfato de magnesio, que contribuyen a su eficacia (Amoquimicos Colombia).

2.3.1 Ventajas

- a) Su absorción es fácil, rápida y funciona con la misma efectividad en todos los climas (Amoquimicos Colombia).
- b) Incrementa la producción de los cultivos (Jácome, 2011)
- c) Proporciona altos niveles de nutrientes a las plantas de manera eficiente y económica (Zoom, s,f)

2.3.2 Desventajas

- a) Necesitan más energía para su fabricación y transporte (Andrade, 2013)
- b) Genera residuos químicos en el suelo, ocasionando problemáticas ambientales (Amoquimicos Colombia).

2.3.3 Tipos de fertilizantes inorgánicos

- a) *Fertilizantes nitrogenados*: Este tipo de productos se encuentran en diversas formas como nitrato de amonio, nitrato de potasio, nitrato de calcio y urea. Se caracterizan

por tener altos niveles de nitrógeno, siendo este uno de los nutrientes que más necesitan las plantas para su crecimiento.

- b) *Fertilizantes de fósforo*: Este tipo de fertilizante pueden durar mucho tiempo en el suelo después de su aplicación; sin embargo, estos tienen la capacidad de disolverse en agua, lo que no alteran el pH del suelo (Amoquimicos Colombia).
- c) *Fertilizantes de Potasio*: Estos corresponden a sales que generalmente son solubles en agua. Para la fabricación de este tipo de fertilizantes se extrae el 80% del potasio de las minas, 12% de lagos y el 8% en disoluciones de depósitos de sales bajo tierra (Amoquimicos Colombia).

El potasio que se extrae en las minas proviene de diversos minerales, tales como: silvinita, silvita, kainita, carnalita y langbeinita, extrayendo en forma de cloruro de potasio (KCl).

2.4 Fertilizantes orgánicos

Los fertilizantes orgánicos son generalmente abonos que tienen altos contenidos de nitrógeno mineral y cantidades considerables de otros compuestos nutritivos para las plantas, puesto que tienen la capacidad de retener la humedad, retener el pH, aumentar el potasio, calcio y magnesio presentes en el suelo (Amoquimicos Colombia). De igual manera presenta ciertas ventajas como: permite la fijación de carbono en el suelo, recupera la materia orgánica del suelo, requiere menos energía para su fabricación; sin embargo, tiene una desventaja y es que son fuentes de patógenos si no están adecuadamente tratados.

2.5 Fertilizantes orgánicos minerales

Estos productos son la “combinación de materiales orgánicos y minerales; es decir, contienen materia orgánica y nutrientes minerales en el mismo producto” (Gómez, S.F).

En su proceso de fabricación se adicionan componentes orgánicos y minerales, con el fin de que, al momento de agregar estos productos, se incorpore la materia orgánica y los nutrientes de origen mineral.

Los fertilizantes orgánicos-minerales presentan ventajas como la incorporación de materia orgánica y nutrientes al suelo, siendo más fácil su asimilación. Estos productos se fabrican de forma granulada, pellet o líquido que facilita su aplicación por medio del sistema de riego.

3. ALTERNATIVAS DE FERTILIZACION DE SUELOS

Este capítulo abarca las alternativas de fertilización existentes para suplir las necesidades nutricionales de los suelos agrícolas, con el fin de mejorar el crecimiento de las plantas y el desarrollo de los productos alimenticios. Dentro de dichas alternativas, se encuentran los fertilizantes orgánicos y los biofertilizantes producidos a partir de la inocuidad de microorganismos tales como bacterias, hongos e incluso microalgas. Estas alternativas ayudan a disminuir la necesidad de aplicación de fertilizantes químicos en los diferentes cultivos de Colombia, lo que mitiga los impactos ambientales y de salud ocasionados por el uso de estos productos agrícolas.

3.1 Fertilizantes orgánicos

Los fertilizantes orgánicos son productos de origen animal o vegetal que tienen como propósito aportar nutrientes a las plantas que generalmente provienen de materiales carbonados (Calsina, 2020).

3.1.1 Ventajas y desventajas de fertilizantes orgánicos

Al ser los fertilizantes orgánicos una alternativa de fertilización para los cultivos, reemplazando los productos químicos, es necesario conocer por medio de la tabla 1 las ventajas y desventajas que este tipo de fertilizantes presenta tanto en su fabricación como en la aplicación a los suelos con carencias nutricionales.

Tabla 1

Ventajas y desventajas que presentan los fertilizantes orgánicos

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Permite la regeneración de los suelos de forma sólida, eficaz y a largo plazo• El peligro de sobre fertilización es menor al aplicarse este tipo de fertilizantes• Aumentan la presencia de hongos y bacterias que favorecen el suelo	<ul style="list-style-type: none">• La liberación de nutrientes en el suelo puede ser dependiente de las temperaturas del ambiente y la presencia de microorganismos en el suelo.• Existe la posibilidad de que influyan en la presencia de patógenos por aquellos fertilizantes orgánicos que están fabricados

Tabla 1 (Continuación)

<ul style="list-style-type: none">• Facilita el desarrollo de organismos como lombrices que son fundamentales para la fertilización de los cultivos• Este tipo de fertilizantes son ricos en micronutrientes y macronutrientes necesarios para el crecimiento óptimo de las plantas.• Ayudan a retener los nutrientes del suelo• Permite la fijación de carbono y mejora la capacidad de absorber agua• Requieren menos energía para su elaboración a comparación de los fertilizantes químicos• Permite mantener la humedad necesaria en el suelo para cada tipo de plantaciones.	<p>incompletamente, ocasionando problemas a la salud y al medio ambiente.</p> <ul style="list-style-type: none">• Su precio es más costoso que aquellos que están fabricados con productos químicos.
---	--

Nota. En la tabla 1 se presenta las ventajas y desventajas del uso de los fertilizantes orgánicos en los cultivos. Tomado de: Instituto Idema *Fertilizantes Organicos*.http://books.instituto-idema.org/sites/default/files/2020_11_05_15_16_48_george_90_hotmail.com_Fertilizantes_Organicos.pdf

3.1.2 Tipos de fertilizantes orgánicos

1. *Estiércol*: hace referencia al excremento de los animales, generalmente de vaca, ovejas y cuyes (Calsina, 2020). El estiércol posee diversos nutrientes, pero sobre todo contiene un alto porcentaje de nitrógeno, compuesto principal en el crecimiento y desarrollo de las plantas, generalmente estos fertilizantes son producidos por la ganadería, la avicultura, porcicultura, cunicultura, capricultura y ovicultura. Sin embargo, la calidad de este tipo de fertilizantes influye en la alimentación de los animales, la superficie sobre la que se desplazan y su especie (Alfaro, 2016).

2. *Gallinaza*: este corresponde al excremento o estiércol de las gallinas; sin embargo, esta alternativa de fertilización puede variar según las sustancias que ingiera el animal que posean mayor o menor cantidad de nitrógeno.
3. *Guano de isla*: es un fertilizante orgánico natural completo, adecuado para el crecimiento, desarrollo y producción del cultivo, este tipo de fertilizante contiene macronutrientes como el nitrógeno en composición de 10 a 14%, fósforo de 10-12% y potasio de 2 a 3 % (Calsina, 2020).
4. *Biol*: este fertilizante es líquido, el cual se fabrica a partir de la descomposición de materiales orgánicos, como estiércol de animales, plantas verdes, frutos y demás desechos en ausencia de oxígeno por medio de biodigestores (Calsina, 2020). como se evidencia en la figura

Figura 16

Fertilizante orgánico líquido fabricado por biodigestores



Nota. La imagen muestra uno de los tipos de fertilizantes orgánicos líquidos llamado Biol, que es fabricado en canecas como biodigestores. Tomado de: Instituto idema. Fertilizantes orgánicos.

http://books.instituto-idema.org/sites/default/files/2020_11_05_15_16_48_george_90_hotmail.com_Fertilizantes_Organicos.pdf

Así mismo este tipo de fertilizante orgánico posee la capacidad de acelerar el crecimiento del follaje, induce la floración y fructificación lo que aumenta la maduración de los cultivos. De igual forma presenta otras ventajas como su fácil preparación y preservación, bajo costo, promueve la recuperación de los cultivos afectados por las heladas y/o granizadas, mejora la calidad de los productos, ayuda a soportar con mayor eficacia el ataque de plagas y otras enfermedades, finalmente no afecta la salud de las personas ya que no necesita de elementos de protección personal (Manani y otros, s.f).

5. *Humus de lombriz*: este fertilizante es orgánico y ecológico, en donde las protagonistas de este producto son las lombrices como se puede observar en la figura 17 ya que estos animales digieren el material orgánico, descomponiéndola por medio de enzimas digestivas y microflora presente en el organismo de estos seres vivos, además este producto no es tóxico y mucho menos tiene mal olor dado que durante el proceso de vermicompostaje se elimina cualquier patógeno que pueda existir (Calsina, 2020). De igual forma posee millones de microorganismos por cada gramo de producto, superando el compost tradicional, lo que favorece la solubilización y asimilación de los nutrientes en las plantas de diferentes cultivos.

Figura 17

Humus de Lombriz



Nota. En la figura anterior se muestra el vermicopostaje que será utilizado después como humus de lombriz para fertilizar los suelos agrícolas. Tomado de: *Lombrimadrid (s.f)*. ¿Qué es el humus de lombriz? <https://lombrimadrid.es/lombricultura/humus-de-lombriz-caracteristicas-beneficios/>

6. *Compost*: en la figura 18 se evidencia un tipo de fertilizante orgánico, el cual se obtiene a partir de un proceso biológico controlado de oxidación, donde los organismos presentes en el material orgánico fabrican un abono de elevada calidad denominado compostaje.

Figura 18
Compostaje



Nota. En la figura anterior se evidencia el compostaje realizado a partir de materiales de origen orgánico. Tomado de: *Instituto Idema*. Fertilizantes orgánicos.

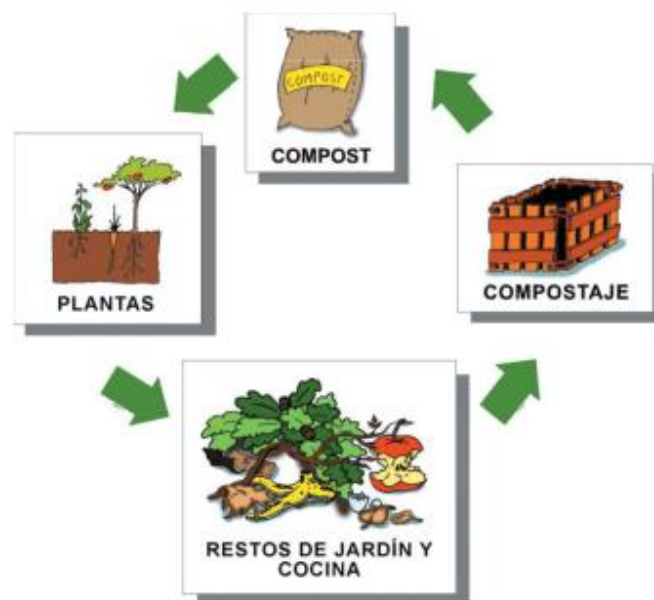
http://books.institutoidema.org/sites/default/files/2020_11_05_15_16_48_george_90_hotmail.com_Fertilizantes_Organicos.pdf

Este Fertilizante presenta ciertos beneficios como el efecto positivo en el suelo por la formación de conglomerados, lo que permite mantener una correcta aireación y humedad; mejora la salud del suelo dado que no tiene compuestos químicos y está libre de patógenos, actuando así como bactericida y fungicida; aporta nutrientes y macronutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas; por último, es un producto con fácil accesibilidad y de bajo costo dado que en cualquier hogar se puede producir (Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino, 2011). Así mismo, al ser un fertilizante fabricado por residuos orgánicos, se considera que el compostaje se

encuentra dentro de la economía circular que hoy en día todas las industrias están centradas en implementar dentro de sus procesos de producción, esto se ve reflejado en la figura 19, en donde el compostaje es aplicado a los cultivos agrícolas para el crecimiento óptimo de las plantas y una adecuada producción de productos alimenticios, los residuos de cocina de dichos productos son reutilizados para realizar el compostaje y nuevamente este se aplica a los suelos, siguiendo así una de las alternativas de fertilización que ayuda a disminuir el impacto ambiental y suplir las necesidades del ser humano.

Figura 19

Economía circular del compostaje



Nota. La figura anterior trata sobre el ciclo del uso y fabricación del compostaje, en donde parte de los residuos agrícolas de tipo orgánico para el desarrollo de este tipo de fertilizante y su aplicación en cultivos para el adecuado crecimiento de las plantas y producción de alimentos. Tomado de: Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino (2011). Compostaje. https://www.miteco.gob.es/images/es/Manual%20de%20compostaje%202011%20PAGINAS%201-24_tcm30-185556.pdf

Al ser el compostaje una de las mejores alternativas de fertilización, es importante conocer su proceso, el cual dura aproximadamente seis meses y se presentan tres fases que son:

- Latencia y crecimiento: en esta fase los microorganismos están asimilando su nuevo medio y el inicio de la multiplicación y colonización de los residuos, generalmente esta fase dura aproximadamente de dos a cuatro días y empieza con la degradación de los elementos biodegradables por parte de las bacterias (Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino, 2011).
- Fase termófila: el tiempo de duración de este proceso depende del tipo de sistema, si este es de forma rápida la fase puede durar entre una semana, mientras que en los sistemas de fermentación lenta el tiempo es aproximadamente de uno a dos meses. Debido al aumento de temperatura y la actividad intensa de las bacterias en la fase anterior, empieza la aparición de organismos termófilos que actúan a un rango de temperatura de 60 a 70°C lo que aumenta el tiempo de degradación de la materia orgánica. Además, en esta fase se garantiza la higienización y eliminación de gérmenes patógenos, larvas y semillas que puedan afectar a la salud del suelo (Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino, 2011).
- Fase de maduración: es de las fases más lentas ya que puede durar hasta 3 meses, dado que la materia menos biodegradable se va degradando y la temperatura del proceso de descomposición disminuye al igual que la actividad de las bacterias; sin embargo, se produce grandes cantidades colonizaciones de microorganismos lo que ayuda a degradar dicha materia menos degradable (Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino, 2011).

Por último, es importante resaltar que existen dos tipos de compostaje debido al tiempo que dura el proceso, el primero es el compost fresco ya que su tiempo de proceso es de dos a 3 meses y es usado como protección frente a cambios de temperatura y humedad, mejorando las características del suelo y el segundo tipo es el compost maduro (tiempo

de proceso de 5 a 6 meses), que es utilizado como fertilizante en los suelos por su capacidad de aportar nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, además de una adecuada retención de agua (Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino, 2011).

3.2 Biofertilizantes a partir de microorganismos

Los biofertilizantes son productos agrícolas que contienen microorganismos inoculados, logrando vivir en simbiosis o asociados con las plantas, en donde aportan nutrientes y protección necesarios para el buen crecimiento y desarrollo de las mismas. Los microorganismos se encuentran de forma natural en una gran cantidad de grupos en el suelo, pero estos se han visto afectados por el manejo inadecuado de este recurso y el uso excesivo de productos químicos.

Estos productos se clasifican en dos grupos: el primero es por acción directa, el cual consiste en la agrupación de los microorganismos que habita en alguna parte de la planta, quedando la acción benéfica en la misma y no en el medio circulante y el segundo es por acción indirecta que hace referencia al aprovechamiento de la biofertilización en el suelo y después hacia los cultivos (Márquez, 2011).

3.2.1 *Microorganismos en el suelo*

Para empezar a explicar sobre los biofertilizantes con microorganismos, es necesario partir del hábitat de estos y el cómo se pueden utilizar para beneficio de los cultivos. Como ya se mencionó el hábitat de estos microorganismos es el suelo ya que por su “estructura les permite acomodarse tanto en el exterior como en el interior de los agregados” (Asociación Vida Sana, s.f), lo que facilita su desarrollo, pero para que el suelo se encuentre en una adecuada estructura, es necesario que el agua y el aire circulen con facilidad, además de que exista un equilibrio que les permita el desarrollo de las colonias de los microorganismos.

Estos microorganismos tienden a encontrarse en la zona cercana a las raíces de las plantas, mayor conocido como “rizosfera”, donde su actividad bioquímica produce unos exudados radiculares, que significa la liberación de sustancias orgánicas como azúcares, aminoácidos, ácidos orgánicos, enzimas, hormonas, entre otros, donde funcionan como alimento para el óptimo desarrollo de los microbios y así mismo estos le aportan minerales que son necesarios para el crecimiento de las plantas.

El papel de la rizosfera es de gran importancia en los cultivos agrícolas, ya que modifica la estructura del suelo; es decir que los microorganismos tienen un papel importante en la secreción de las sustancias agregantes que son resultado de la floculación, cementación y reacomodo de las partículas. “La estabilización de los agregados se lleva a cabo por la unión de la materia orgánica unida con la excreción de los microorganismos y mucus de lombrices” (Torres et al., 2013), por ello, si la actividad microbiana disminuye, así mismo decrece la formación de agregados, generando perturbaciones en el suelo.

De igual forma, la rizosfera contribuye a la nutrición de las plantas, especialmente en el metabolismo del nitrógeno y la solubilización de elementos minerales. En cuanto al metabolismo del nitrógeno en la rizosfera se encuentra activado desde la fijación del nitrógeno atmosférico hasta la nitrificación, ofreciéndole a las plantas las mejores condiciones para extraer del suelo el nitrógeno que necesitan para su óptimo crecimiento. “El conjunto de la microflora tiene también una acción metabólica muy importante en relación con los elementos minerales; el carbonato cálcico y otros compuestos insolubles son solubilizados y el calcio y otros elementos puestos a disposición de las plantas” (Asociación Vida Sana, s.f).

El efecto de la rizosfera aumenta proporcionalmente con respecto al desarrollo de la planta; es decir, desde el momento en que empieza la germinación, alcanzando un máximo en la fructificación y después decrece lentamente debido a las sustancias nutritivas que encuentran los microorganismos asociados a las micorrizas en los restos de las raíces, cuando las plantas mueren.

Por último, la Asociación Vida Sana recalca que la gran cantidad de microorganismos que se encuentran en la rizosfera, están relacionados con las plantas en tres formas: sapa trófica que significa que se alimentan de los residuos de las plantas; parasita ya que pueden causar enfermedades a las plantas cuando estos son patógenos y finalmente simbiótica dado que brindan nutrientes a las plantas como alimento para su adecuado crecimiento.

Dentro de estos microorganismos benéficos para las plantas se encuentran las bacterias fijadoras de nitrógeno atmosférico, hongos de micorrizas arbusculares, bacterias promotoras de crecimiento vegetal y se ha venido estudiando las microalgas para el aporte de nutrientes de las especies vegetales.

3.2.2 Hongos

Los hongos son considerados como organismos unicelulares o pluricelulares heterótrofos que no forman auténticos tejidos, estos se reproducen de forma sexual y asexual por medio de las esporas que estos contienen.

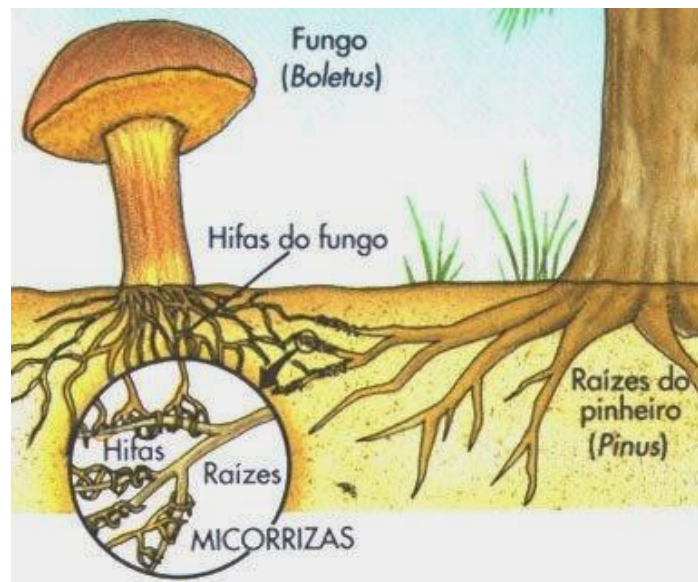
Dentro de la agricultura existe un gran problema y es la baja disponibilidad de fósforo en el suelo y la baja capacidad para retenerlo en formas no disponibles para las plantas, por eso una alternativa biotecnológica para esto es el emplear masivamente hongos micorrizales. Este término fue propuesto para describir la asociación simbiótica que se presenta de manera natural; el uso de estos hongos consiste en la colonización de la raíz de la planta con el fin de aportarle agua y nutrientes que absorbe del suelo a través de su red externa de hifas (Osorio, 2012).

Como se mencionó anteriormente, las micorrizas son un tipo de hongo que está constituido por un conjunto de hifas fúngicas, que se enlazan con las raíces de las plantas desde el primer momento en que hacen contacto como se observa en la figura 20. De igual forma, las hifas se ramifican en el suelo, lo que favorece la interconexión entre las raíces de las plantas y el suelo, lo que facilita el flujo de nutrientes presentes en este

recurso hacia las plantas, pero también les ofrece otros beneficios como: protección ante el ataque de parásitos, hongos patógenos y nematodos, aumento de resistencia a la herbívora, limita la absorción de metales pesados tóxicos como zinc y cadmio e incrementa el flujo de agua del suelo hacia la planta. Así mismo mejora las propiedades físicas y químicas del suelo, por medio del enriquecimiento de materia orgánica, contribuyendo a la estabilidad del suelo y evitando la erosión del mismo.

Figura 20

Hongos de tipo micorrizas utilizados como biofertilizante



Nota. La figura anterior muestra la interconexión de las hifas de los hongos utilizados como fertilizantes en las raíces de un árbol, lo que explica el funcionamiento de estos microorganismos en la fijación de nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas. Tomado de: La biodiversidad de los hongos(2014). Las micorrizas <http://biodiversidadenhongos.blogspot.com/2014/03/las-micorrizas.html>

Los hongos micorrizales se clasifican en dos tipos, según las hifas; es decir si permanecen el exterior de la raíz o en el interior:

a) Ectomicorrizas: estas asociaciones son caracterizadas por las hifas de los hongos que no penetran en el interior de las células de la raíz, sino que se ubican sobre y en la

separación de estas (Osorio, 2012). De igual forma, se pueden observar a simple vista a partir de esporocarpos o cuerpos fructíferos de diferentes colores (figura 21)

Figura 21

Esporcarpos de hongos



Nota. En la figura anterior se observa los esporocarpos por los que son identificados los hongos micorrizales con hifas que no penetran en el interior de las células de la raíz. Tomado de: Biunix (2012). Cuerpo fructífero <https://biunix.wordpress.com/tag/cuerpo-fructifero/>

Este tipo de micorrizas puede afectar la totalidad de las raíces o solamente una parte, así mismo puede coexistir más de un tipo de hongo que se puede distinguir por su coloración. Además esta asociación la forman muchos de los árboles presentes en los bosques y selvas, dando lugar a las setas. En la figura 22 se evidencia las ectomicorrizas en las raíces de las plantas:

Figura 22

Ectomicorrizas en las raíces de las plantas

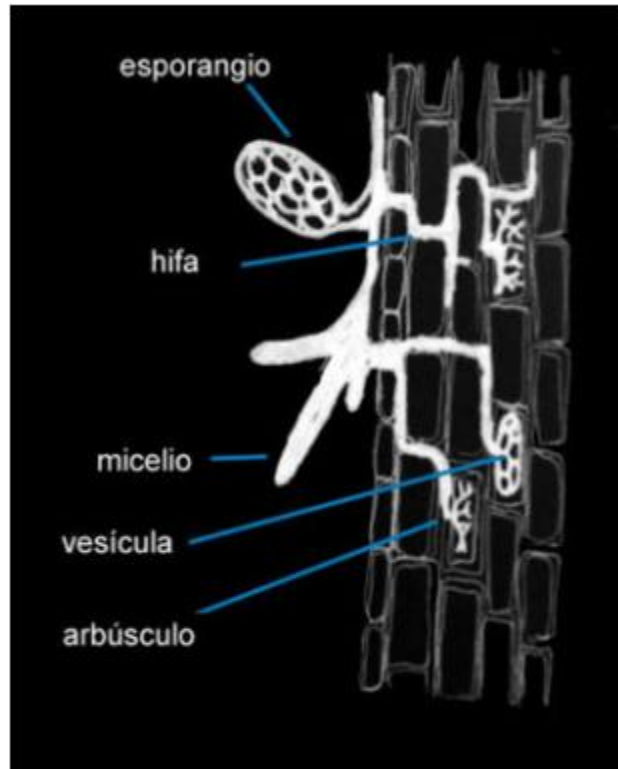


Nota. En la figura anterior se evidencia la presencia de las micorrizas sobre y en la separación de las raíces, sin ninguna penetración a sus células. Tomado de: Asociación vida sana (s,f). Microorganismos del suelo y biofertilización, https://cultivos-tradicionales.com/upload/file/dossier-5_microorganismos-del-suelo-y-biofertilizacion-2.pdf

b) Endomicorrizas: estas aparecen en una gran diversidad de plantas y consiste en la penetración del micelio correspondiente del hongo en el interior de las células del cortex de la raíz, formando unas estructuras denominadas arbusculos y vesículas (figura 23) que funciona para el intercambio de sustancias nutricionales para el desarrollo y crecimiento de las especies vegetales. Además, este tipo de micorrizas crecen en relación estrecha con gran variedad de cereales, hortalizas, entre otros, permitiendo un incremento en el rendimiento del cultivo y la capacidad de absorción de nutrientes (Osorio, 2012).

Figura 23

Endomicorriza



Nota. En la figura anterior se puede observar las partes de la penetración de la endomicorriza en la raíz de las planta, formando las vesículas y el arbusculo. Tomado de: Lifeder (2019). Ectomicorrizas y endomicorriza, características principales <https://www.lifeder.com/ectomicorrizas-endomicorrizas/>

En conclusión las micorrizas tienen un papel fundamental en las actividades agrícolas ya que aumenta la estabilidad del suelo, aumenta la retención de agua en el suelo, incrementa la absorción de fósforo, protege a las plantas contra enfermedades producidas por hongos y microorganismos del suelo, aumenta el contenido nutricional de las plantas y el control de malas hierbas.

3.2.3 Bacterias

Las bacterias son organismos procariotas unicelulares; algunas pueden encontrarse en condiciones extremas de temperatura y presión, además son de gran abundancia en el

planeta. Estos organismos se multiplican o se reproducen por fisión binaria, la cual consiste obtener dos células hijas con información genética idéntica.

Teniendo en cuenta la necesidad de disponer de insumos agrícolas más amigables con el medio ambiente, eficientes y no provenientes de materiales fósiles, se ha estudiado las capacidades de las bacterias para lograr desarrollar propuestas de inoculantes microbianos provenientes de aislamientos nativos, con la finalidad de mejorar los cultivos en comparación de los fertilizantes de síntesis química.

Un tipo de bacterias que se ha considerado para el uso de biofertilizantes son las fijadoras de nitrógeno; sin embargo, en la agricultura estas bacterias son insuficientes ya que la cantidad de nitrógeno fijado por estos microorganismos son poco importantes para permitir el desarrollo de las plantas, se estima que estas bacterias fijan aproximadamente de 10 a 20 kilogramos de nitrógeno por hectárea al año (FAO, 2002).

Existe una fijación que es más eficaz para los cultivos y es la denominada “fijación simbiótica”, la cual hace referencia al uso de bacterias del tipo *RHIZOBIUM* que viven en los nódulos radiculares de las leguminosas. Básicamente, esto consiste en el contacto de los pelos absorbentes de la raíz con una de las bacterias *Rhizobium*, haciendo que estos pelos se ensortijen y las paredes de la célula se disuelva bajo la influencia de las enzimas formando un nódulo. “Cuando la bacteria se encuentra dentro del nódulo esta obtiene todos los nutrientes necesarios como los compuestos de carbono y a su vez la planta recibe compuestos nitrogenados producidos por la bacteria a partir del nitrógeno gaseoso de la atmosfera al suelo” (Asociación Vida Sana, s.f).

Así mismo existe otro tipo de bacterias que se han considerado como eficientes para la fijación de nitrógeno y es *Azotobacter*. Estos microorganismos son quimio heterótrofos, que generalmente utilizan azúcares, alcoholes y sales orgánicas para crecer. Requieren de molibdeno para fijar nitrógeno y utilizan nitrato, sales de amonio y ciertos aminoácidos como fuentes de nitrógeno. Generalmente, estas bacterias se encuentran en la rizosfera (zona de las raíces) y en las hojas (filósfera) de las plantas, las cuales forman unos

quistes que “se caracterizan por ser esféricos, producidos por el acortamiento y redondeo de una célula vegetativa con una doble capa que rodea la estructura entera, ofreciendo protección a algunas condiciones de stress ambiental. Los quistes han demostrado mayor resistencia al calor, sonicación y tratamientos con luz ultravioleta, a comparación de las células vegetativas” (Rusique, 2010).

Figura 24

*Quistes formados por bacterias fijadoras de nitrógeno
Azotobacter*



Nota. En la figura anterior se puede observar los quistes en las raíces de las plantas a causa de las bacterias *Azotobacter* presentes en la rizosfera. Tomado de: *Infocampo (2018)*. La capacidad de fijar nitrógeno estaría determinada por cuestiones evolutivas. <https://www.infocampo.com.ar/la-capacidad-de-fijar-nitrogeno-estaria-determinada-por-cuestiones-evolutivas/>

Para mayor entendimiento, en la figura 24 se muestra los quistes que se forman por las bacterias fijadoras de nitrógeno en las raíces de las plantas, siendo este el medio por el que se le aportan los nutrientes a las plantas. Así mismo las bacterias de tipo *Azotobacter* son capaces de fijar al menos 10 miligramos de N_2 por cada gramo de carbohidrato; sin embargo, su crecimiento depende fuertemente de la materia orgánica, humedad y pH (Rusique, 2010).

3.2.4 Microalgas

Las microalgas son organismos fotosintéticos, autótrofos, de menor complejidad estructural a comparación de las plantas terrestres, en el mundo existe alrededor de 200000 y 800000 especies diferentes de estos organismos, lo que facilita el uso de sus compuestos en diferentes industrias (Sanchez, 2020). Para la agricultura, estos microorganismos poseen un contenido considerable de micro y macro nutrientes, que tienen un potencial de mejorar la disponibilidad de los mismos en los suelos, promoviendo cultivos más robustos y saludables, dentro de los nutrientes que estos microorganismos les aporta a las plantas se encuentra el fósforo, potasio, nitrógeno y calcio.

Además, estos microorganismos representan la oportunidad de contribuir en la solución de diferentes problemas actuales, como la contaminación por gases de efecto invernadero y contaminación del agua generados por el uso inadecuado de fertilizantes químicos, como se explicó en el capítulo 2 de la presente monografía.

El uso de microalgas en la producción de biofertilizantes ha surgido como un aporte de la biotecnología debido a su capacidad multifuncional, eficiencia fotosintética y la capacidad que tienen estos organismos en suministrar nitrógeno a las plantas. Así mismo, se ha demostrado por estudios que ciertos extractos de microalgas incrementan el potencial de crecimiento de las plantas por medio de reguladores (auxinas, giberelinas y citoquinas) y altos niveles de macro y micronutrientes que son indispensables para el óptimo desarrollo de los cultivos.

a) *Tipos de microalgas para la producción de biofertilizantes:* En la tabla 2 se evidencia los tipos de microalgas que han sido estudiadas para la producción de biofertilizantes. Estos insumos agrícolas producidos a base de algas tienen la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico, secuestran el CO₂ atmosférico, mejora la estructura del suelo, incrementa la retención del agua y producen auxinas, giberelinas, vitaminas y aminoácidos (Reinoso & Araujo, 2019).

Específicamente las auxinas y giberelinas son consideradas fitohormonas que tienen un papel importante en el crecimiento de las plantas. Las auxinas contribuyen a los procesos de división, elongación y diferenciación celular (Garay y otros, 2014). Se sintetizan en los tallos y donde crecen las hojas, una vez se encuentran en estos puntos empiezan a distribuirse a otras partes de la planta que se considere necesaria su presencia; sin embargo, se ha demostrado que la mayor proporción de estas fitohormonas se distribuyen hacia las raíces, brindándoles más rigidez, para un óptimo crecimiento y desarrollo de la planta.

Las giberelinas más conocido como el Ácido giberelico GA3 contribuye a la estimulación de la germinación y floración de las especies vegetales. Estas fitohormonas se encuentran en todas las etapas del desarrollo de crecimiento de las plantas por sus efectos fisiológicos, los cuales se encuentra el incremento en la altura de la planta, induce la germinación de semillas que se encuentran en estado de dormancia, promueve el desarrollo de muchos frutos, entre otros.

Por otro lado, al terminar el ciclo de vida de las microalgas, estas se convierten en beneficio para el desarrollo de otros microorganismos presentes en el suelo, ya que secretan exopolisacáridos y sustancias bioactivas que intervienen en la recuperación de nutrientes de la tierra y permite la movilización de formas insolubles de fosfatos inorgánicos (Reinoso & Araujo, 2019).

Los autores Reinoso y Araujo, dicen que al inocular microalgas en los cultivos promueve que las plantas generen enzimas de defensa, transportadores y agentes quelantes entre otras sustancias que pueden incrementar el crecimiento, rendimiento de los cultivos y la inmunidad de la planta a patógenos. De igual forma, aumenta la calidad de los frutos, las características nutricionales, el rendimiento del grano y mejoran las interacciones microbianas de los organismos presentes en el suelo

Tabla 2

Tipos de microalgas utilizadas para la producción de biofertilizantes

Alga	Tipo	Cultivo	Referencia
Nostoc sp.	Verde-Azul	Arroz (<i>Oryza sativa</i>)	Tripathi et al., 2008
Anabaena doliolum	Verde-Azul	Arroz (<i>Oryza sativa</i>)	
Westiellopsis sp.	Verde-Azul	Arroz (<i>Oryza sativa</i>)	
Chlorella minutissima	Verde	Frejol (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	Khan et al., 2019Hovde et al., 2018Tello, 2018
Scendesmus sp.	Verde	Frejol(<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	Khan et al., 2019Tello, 2018
Nannochloropsissp.	Verde	Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)	Coppens et al., 2015

Nota. La tabla anterior está clasificada por el tipo de microalgas que se ha utilizado como biofertilizante en los respectivos cultivos. Tomado de: Revista del centro de estudio y desarrollo de la amazonia –CEDAMAZ- (2019). Producción de biofertilizantes a partir de microalgas <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/cedamaz/article/view/648/707>

4. COMPARACIÓN DE LOS CASOS DE ÉXITO DE LA APLICACIÓN DE LA BIOTECNOLOGÍA

Teniendo en cuenta los capítulos anteriores, a continuación, se realiza una comparación de los casos de éxito en donde hicieron uso de microorganismos como bacterias, hongos y microalgas como fuente de alternativa para fertilización en diferentes tipos de cultivo, con el fin de describir el más adecuado o aquel que presenta mayores beneficios y ventajas en la agricultura, supliendo la necesidad agrícola y disminuyendo la contaminación ambiental.

4.1 Inoculación con bacterias promotoras de crecimiento vegetal en tomate bajo condiciones de invernadero

El presente caso de estudio fue realizado en el año 2010 en Mosquera (Cundinamarca-Colombia) en donde evaluaron el efecto de la inoculación de las bacterias promotoras de crecimiento vegetal en los cultivos de tomate y su capacidad fisiológica de solubilización de fosfatos tanto inorgánicos como orgánicos.

Para esto los autores seleccionaron las cepas *Pseudomonas fluorescens* PSO13, *Pseudomonas putida* PSO14 y *Bacillus* sp, las cuales fueron proporcionadas por el banco de microorganismos de laboratorio de control biológico CORPOICA y las cepas *Enterobacter* sp TVL-1 y TVL-2 y *Enterobacter agglomerans* UV1 fueron proporcionadas por el banco de microorganismos del laboratorio de microbiología de suelos de CORPOICA. Dichas cepas fueron reactivadas por un medio de cultivo con roca fosfórica al 0.5% como fuente de fósforo, $\text{NH}_4(\text{SO}_4)_2$ 0.5, KCl 0.2, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.3, $\text{MnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.004, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.2, púrpura de bromocresol 0.1, agar 15.0, pH: 7.2) a 30 ± 2 °C durante 48 h. (Sánchez D. y otros, 2012)

Para la evaluación bajo condiciones de invernadero, sumergieron las raíces de las plántulas de tomate en una suspensión bacteriana de 200 mililitros con una concentración de 10^8 unidades formadoras de colonia por mililitro durante 30 minutos y se transfirieron a bolsas plásticas con capacidad de 2 kilogramos. El suelo que

emplearon no estaba esterilizado, por lo que cuenta con un pH de 5.9; el experimento estuvo bajo condiciones de invernadero por tres meses a una temperatura promedio de 7°C y máxima de 37°C. En cuanto a la fertilización biológica, los autores la realizaron al primer y segundo mes de siembra con 1 mililitro de los inóculos de las bacterias nombradas anteriormente.

Los autores Diana Sánchez, Ruth Gómez, María Fernanda Garrido y Ruth Buitrago quienes realizaron dicho caso de éxito, afirman que implementaron un diseño completamente al azar, con siete tratamientos: T₀= testigo absoluto, T₁=testigo químico, T₂= 1 mililitro de inóculo de TVL-1 y 50% de fertilización química, T₃= 1 mililitro de inóculo de TVL-2 y 50% de fertilización química, T₄= 1 mililitro de inóculo PSO13 y 50% de fertilización química T₅= 1 mililitro de inóculo PSO14 y 50% de fertilización química T₆= 1 mililitro de inóculo de BEOO2 y 50% de fertilización química T₇= 1 mililitro de inóculo de BEOO3 y 50% de fertilización química T₈= 1 mililitro de inóculo UV1 y 50% de fertilización química. Las variables que evaluaron con este experimento son: longitud de la parte aérea, longitud radical, peso seco de la parte aérea, peso seco de la raíz y producción de flores y frutos (Sánchez D. et al., 2012).

4.2 Uso del hongo *Trichoderma* (*Trichoderma* sp) como biofertilizante en el cultivo de arroz (*ORYZA SATIVA* L.), comunidad “las gilces- crucita”

Esta tesis fue desarrollada en el año 2021, con el fin de evaluar el uso del hongo *Trichoderma* como biofertilizante en el cultivo de arroz, el cual determinarían la altura y número de macollos de la planta al ser aplicados estos microorganismos en dicho cultivo en el país de Ecuador. Para esto tomaron 5 tratamientos con diferentes dosis y 4 repeticiones, denominados T₁ (150 gramos por hectárea), T₂ (350 gramos por hectárea), T₃ (450 gramos por hectárea), T₄ (600 gramos por hectárea) y un T₅ (sin uso de *Trichoderma*), que corresponde al de referencia; la aplicación del hongo se realizó con intervalos de 21 días, desde la siembra hasta la cosecha; es decir en un periodo de tiempo de febrero a junio del año 2021 (Sánchez J. , 2021).

4.3 Eficacia de extractos de microalgas como bioestimulantes mediante tratamiento de semillas y aspersión foliar para el cultivo de tomate

El tercer caso de éxito hace referencia al uso del extracto de microorganismos denominados microalgas como biofertilizantes en el cultivo de tomate. Los autores de este caso de estudio utilizaron los extractos celulares de biomasa seca de un grupo de microalgas robustas cultivadas en orina humana diluida al 6,5% (v/v), específicamente los extractos se tomaron en un rango de concentración del 20%-100%, los cuales se caracterizaron por la presencia de constituyentes bioquímicos para después ser utilizados en el tratamiento de semillas, con el fin de mejorar las tasas de germinación y de crecimiento de la planta por medio de la pulverización foliar. En cuanto a la determinación de la tasa de crecimiento, tuvieron en cuenta el aumento de la biomasa, la longitud de los brotes y el número de hojas durante el periodo de crecimiento, de igual forma midieron la clorofila y el contenido elemental de la biomasa vegetal después de la cosecha.

El grupo mixto de microalgas que seleccionaron para el presente estudio, son *Chlorella sp*, *Scenedesmus sp*, *Spirulina sp* y *Synechocystis sp*. Las cuales las obtuvieron de aguas residuales del Instituto Nacional de Tecnología (NIT), después fueron enriquecidas con 6,5% (v/v) de orina humana y cultivadas a temperatura ambiente con una intensidad lumínica de 205 μ mol fotones y se dejó en proceso de crecimiento. Pasada esta etapa, se procesó a eliminar las sales residuales que afectaban el crecimiento de la planta, después se le realizó un proceso de lavado y secado para así continuar con la extracción de los constituyentes hidrosolubles orgánicos e inorgánicos para ser utilizados como bioestimulantes.

Después del proceso de la extracción de los constituyentes por medio de centrifugación, se realizó la caracterización fisicoquímica de los extractos de algas para analizar el contenido bioquímico y las propiedades físicas. En seguida a esto se procedió a realizar el pretratamiento de las semillas de tomate, en donde inicialmente se remojaron con 20 mililitros de hipoclorito de sodio al 5% durante 10 minutos y se lavaron tres veces con

agua des ionizada, para después dejarlas secar a temperatura ambiente. Una vez secas las semillas, se distribuyeron en placas Petri de 50 milímetros con 10 semillas y 10 mililitros de concentraciones apropiadas de extractos celulares de microalgas por cada placa, las cuales se llevaron a incubación por 24 horas a temperatura ambiente.

Finalmente, para determinar la tasa de crecimiento y productividad de las plantas, se plantaron las semillas de tomate pre tratadas en diferentes macetas, a las cuales se les empezó a hacer una aspersión foliar cada 5 días con diferentes concentraciones de extractos celulares de microalgas (20,40, 60, 80 y 100%) y una con agua destilada, la cual funciona como referencia para los resultados (Supraja y otros, 2020).

4.4 Comparación de los resultados de los tres casos de éxito

Por medio de la tabla – se hace una comparación de los resultados más relevantes que obtuvieron los autores de los tres casos de éxito del uso de microorganismos (bacterias, hongos y microalgas) como biofertilizantes en los cultivos de tomate y arroz.

Tabla 3

Cuadro comparativo sobre los resultados de los casos de éxito de la aplicación de la biotecnología por medio del uso de microorganismos en fertilizantes

<p>Caso de éxito 1: Inoculación con bacterias promotoras de crecimiento vegetal en tomate bajo condiciones de invernadero.</p>	<p>Caso de éxito 2: Uso del hongo <i>Trichoderma</i> (<i>Trichoderma</i> sp) como biofertilizante en el cultivo de arroz (<i>ORYZA SATIVA</i> L.), comunidad “las gilces- crucita”</p>	<p>Caso de éxito 3: Eficacia de extractos de microalgas como bioestimulantes mediante tratamiento de semillas y aspersión foliar para el cultivo de tomate</p>
<ul style="list-style-type: none"> • A los 90 días después de la siembra se tiene obtiene una longitud radical de la planta de tomate de aproximadamente de 50 cm con el uso de la bacteria <i>P. Putida</i>, siendo este resultado significativo con respecto al testigo absoluto que corresponde a aquel que no le fue aplicada ninguna especie bacteriana (30 cm). • Con respecto a la altura de la planta de tomate, también se presentaron resultados significativos ya que a los 90 días después del experimento, el tratamiento con la bacteria <i>P. Putida</i> como biofertilizante obtuvo un resultado tres veces mayor (20 cm) que el testigo absoluto o el tratamiento de referencia (70 cm). 	<ul style="list-style-type: none"> • El rango de altura de la planta que se presentaron en los cuatro tratamientos con el hongo como biofertilizantes es de 106,95 cm – 107, 80cm; lo cual tiene una comparación significativa con respecto a la altura de la planta sin aplicación de <i>Trichoderma</i> (86,68cm). • El número de macollos en los tratamientos a los que se le aplicaron <i>Trichoderma</i> sp. Son mayores (155-157,5 macollos) a comparación de aquel que no tiene aplicación de biofertilizante (81 macollos). • En cuanto al rendimiento del cultivo, se obtiene mayores resultados en los tratamientos a los que se le aplicaron 	<ul style="list-style-type: none"> • Biomasa de microalgas cuenta con cantidad de carbohidratos (40.90%), Proteínas (26.18%) y lípidos (27.20%) sirviendo como precursores de fitohormonas. • La longitud de las raíces con el pretratamiento de las semillas pasados los 20 días es de aproximadamente 19.6 ± 0.5 cm con extractos celulares de microalgas del 40%, siendo este resultado el mayor con respecto a las otras concentraciones y significativo a comparación de la muestra sin tratamiento alguno (aprox. 6 cm) • El número de hojas después de la pos cosecha con el pretratamiento de las semillas fue de $3,6 \pm 1,9$ hojas con

Tabla 3 (Continuación)

<ul style="list-style-type: none"> • Los resultados en el número de flores obtenido a los 90 días de todos los tratamientos con uso de cepas bacterianas fueron significativamente mayor a comparación de aquel que no tiene uso de estos microorganismos; sin embargo, el que presento mayor resultado con 9 flores por planta fue con la cepa <i>Enterobacter sp</i> a comparación del tratamiento absoluto que fue de solamente una flor • El peso seco de la raíz fue mayor con la cepa <i>Enterobacter sp</i> con un resultado significativamente mayor (aprox. 6 g) a comparación del testigo absoluto (menos de 1g). 	<ul style="list-style-type: none"> • Trichoderma como biofertilizante (7272,7 kilogramos por hectárea – 8068,1 kilogramos por hectárea) a comparación de aquel tratamiento convencional sin uso de este microorganismo (4079, 5 kilogramos por hectárea). • Los tratamientos aislados con Trichoderma tuvieron una mayor colonización de raíces, lo cual incremento la absorción de macronutrientes como nitrógeno y fósforo, influyendo en el crecimiento de las plantas, con un 20% a diferencia del tratamiento convencional. 	<p>extractos celulares de microalgas del 40%, siendo este resultado mayor con respecto a las otras concentraciones y significativo a comparación de la muestra sin tratamiento (aprox. 13 hojas)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Los resultados del contenido de clorofila con el pretratamiento de las semillas para la concentración de 40% de extractos celulares de microalgas fue de $1,86 \pm 0,417$ miligramos de carotenoides, siendo este el mayor valor con respecto a las otras concentraciones y significativo con la muestra sin tratamiento (aprox 3 miligramos). • Con la pulverización foliar, se obtuvo como resultados una longitud de las raíces de $5,8 \pm 0,16$ cm con concentración de 60% de extractos celulares de microalgas, siendo significativamente a comparación de la muestra sin tratamiento. • El mayor número de hojas obtenido con la pulverización foliar es de $11 \pm 0,35$ con concentración de 60% de extractos celulares, siendo este valor significativo en
---	--	---

Tabla 3 (Continuación)

		comparación de la muestra sin tratamiento (6±0,35)En cuanto al contenido de clorofila con la pulverización foliar, el resultado mayor fue de 13,45±0,307 miligramos de carotenoides con concentración de 60% de extractos celulares a comparación de la muestra sin tratamiento.
--	--	--

Nota. En la tabla anterior se muestra la comparación de los tres casos de éxito con uso de bacterias, hongos y microalgas, con respecto a los tratamientos de referencia en los diferentes cultivos.

Teniendo en cuenta la tabla 3 que hace referencia a la comparación de los tres casos de éxito, se puede evidenciar que los microorganismos, bacterias, hongos y microalgas presentan resultados satisfactorios como biofertilizantes en cada uno de los cultivos de estudio, comparándolos con los tratamientos a los que no se aplicó ninguno de estos microorganismos. Por lo que la aplicación de la biotecnología en fertilizantes es una de las mejores alternativas para suplir la necesidad agrícola y disminuir el impacto ambiental ocasionado por el uso de fertilizantes químicos. Cabe resaltar que las microalgas es el tipo de microorganismo con mejores beneficios para utilizarlo como fertilizantes, ya que gracias a su morfología tienen ciertas capacidades como realizar fotosíntesis, capturar el carbono atmosférico y demás, que benefician a las plantas al ser cada uno de estos elementos nutrientes necesarios para su correcto desarrollo y crecimiento.

5. CONCLUSIONES

El uso inadecuado de fertilizantes químicos causa diferentes problemáticas ambientales como la eutrofización, degradación de suelos agrícolas, contaminación de aguas subterráneas y contaminación del aire. Así mismo se presenta dos problemáticas de salud en las personas que hacen uso de estos insumos agrícolas y en la población consumidora de los alimentos cosechados con el uso de fertilizantes, dichas enfermedades son las denominadas metahemoglobinemia y nitrosaminas. Por ello, empezaron los estudios sobre la posibilidad de utilizar microorganismos como bacterias, hongos y microalgas en biofertilizantes.

Colombia al ser uno de los países con mayor potencial agricultor se hacen uso de insumos agrícolas como los fertilizantes para cumplir con la demanda alimenticia de la población; sin embargo, el porcentaje con mayor participación de este tipo de insumos agrícolas es de 83,72% de tipo inorgánico, siendo el mayor porcentaje a comparación de los tipos orgánicos y orgánico-mineral, por lo que aumenta las problemáticas ambientales y de salud en el país por el uso de estos productos.

Existen diferentes alternativas de fertilización que son amigables con el medio ambiente, entre ellas se encuentra el compost, humuz de lombriz, estiércol, biol, entre otros que pertenece al tipo de fertilizantes orgánicos. Pero también existe otra alternativa y es el uso de la biotecnología que hace referencia al uso de microorganismos en insumos agrícolas como los fertilizantes, siendo esta de las más estudiadas en los últimos 12 años.

La aplicación de la biotecnología en fertilizantes es uno de los temas más estudiados, por el cual se encontró una gran cantidad de casos de éxito en diferentes cultivos de todo el mundo; sin embargo, se escogieron tres estudios de diferentes años de realización. Los resultados de dichos casos, demuestran la eficiencia de utilizar microorganismos como fertilizantes, lo cual aumenta el potencial de crecimiento de las plantas a

comparación de los métodos convencionales de fertilización, por lo que, es una gran solución para cumplir con la demanda agrícola y así evitar la contaminación ambiental.

Las microalgas han sido el microorganismo con mayores resultados benéficos para la crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que les aporta los macronutrientes y micronutrientes necesarios para dicho crecimiento, además les brinda una mayor cantidad de carotenoides en las hojas, les brinda la posibilidad de capturar el carbono atmosférico como fuente de alimentación, entre otros factores fundamentales. Por lo que se considera que es el tipo de microorganismo más completo para utilizarlo como fertilizantes en los diferentes cultivos de Colombia.

BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, J. G. (2016). El suelo y los abonos orgánicos. *Instituto nacional de innovación y transferencia en tecnología agropecuaria*, 3-106.
<http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F04-10872.pdf>
- Amoquimicos Colombia . (s.f.). *Abono orgánico vs abono inorgánico* . AMOQUIMICOS COLOMBIA S.A.S: <https://www.amoquimicos.com/abono-organico-vs-abono-inorganico>
- Andrade, C. (23 de 01 de 2013). *Ventajas, Desventajas e importancia de los abonos orgánicos para huertas caseras*.
<https://eduteka.icesi.edu.co/proyectos.php/2/17199>
- Asociación Geoinnova . (19 de 05 de 2016). *Fertilizantes con nitrógeno y sus impactos ambientales* . <https://geoinnova.org/blog-territorio/nitrogeno/>
- Asociación Vida Sana. (s.f). Microorganismos del suelo y biofertilización. *Crops for better soil*, 1-43. https://cultivos-tradicionales.com/upload/file/dossier-5_microorganismos-del-suelo-y-biofertilizacion-2.pdf
- Biofabrica . (13 de Noviembre de 2014). *Fertilizantes Químicos usos y consecuencias en la agricultura y a la salud* . Biofertilizantes y agro-sustentabilidad: <https://biofabrica.com.mx/blog/que-son-los-biofertilizantes/fertilizantes-quimicos-usos-y-consecuencias-en-la-agricultura-y-a-la-salud/>
- Calsina, J. L. (2020). *Fertilizantes Organicos*. Instituto Idema . http://books.instituto-idema.org/sites/default/files/2020_11_05_15_16_48_george_90_hotmail.com_Fertilizantes_Organicos.pdf
- DANE. (4 de Junio de 2021). *Radiografía del sector agropecuario en el segundo trimestre de 2021*. <https://www.grupobancolombia.com/wps/portal/empresas/capital-inteligente/actualidad-economica-sectorial/informe-sector-agropecuario-segundo-trimestre-2021>
- DVA. (2021). *Importancia de la agricultura en Colombiana*. DVA GO FURTHER, TOGETHER: <https://dva.com.co/importancia-de-la-agricultura-colombiana/>

- FAO. (2002). *Fertilizantes y su uso* . <https://www.fao.org/3/x4781s/x4781s.pdf>
- Fertilab. (s.f). *Los fertilizantes y sus características*.
<https://www.fertilab.com.mx/Sitio/Vista/Los-Fertilizantes-y-sus- Caracteristicas.php>
- Garay, A., Sánchez, M., García, B., Álvarez, E., & Gutiérrez, C. (2014). La homeostasis de las auxina y su importancia en el desarrollo de Arabidopsis Thaliana. *Laboratorio de Genética Molecular, Epigenética, Desarrollo y Evolución de plantas*, 13-22. <http://www.scielo.org.mx/pdf/reb/v33n1/v33n1a3.pdf>
- Gómez, R. (S.F). *Fertilizantes organicos, organomineral y enmiendas organicas* . AEFA:
<https://aeфа-agronutrientes.org/fertilizantes-organicos-organo-minerales-y-enmiendas-organicas>
- González, P. (03 de 2019). *Consecuencias ambientales de la aplicación de fertilizantes* .
https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/27059/1/Consecuencias_ambientales_de_la_aplicacion_de_fertilizantes.pdf
- Jácome, A. (2011). Efecto de la fertilización orgánica e inorgánica en el cultivo de frijol en un inceptisol con propiedades andicas en la microcuenca centella dagua- Valle. *Universidad del valle*.
- Jakszyn, P. (2006). *Nitrosaminas* .
<https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/7167/tpj.pdf>
- Manani, P., Chavez, E., & ortuño, N. (s.f). El Biol. *PROINPA*, 3.
<https://www.proinpa.org/tic/pdf/Bioinsumos/Biol/pdf59.pdf>
- Márquez, A. G. (4 de Julio de 2011). *Biofertilizantes, los microorganismo benéficos para la agricultura*. Biofábrica siglo XXI: <https://biofabrica.com.mx/blog/en-el-mundo/biofertilizantes-los-microorganismos-beneficos-para-la-agricultura/>
- Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino. (2011). Manual de compostaje. *Amigos de la tierra española*, 12.
https://www.miteco.gob.es/images/es/Manual%20de%20compostaje%202011%20OPAGINAS%201-24_tcm30-185556.pdf

- Oliva, C. V. (Julio de 2017). *Trabajo de fin de grado: Problemas ambientales y de salud derivados del uso de fertilizantes nitrogenados*.
<http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/CRISTINA%20VEGA%20OLIVA.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación -FAO-. (1997). *Los fertilizantes, en cuanto contaminantes del agua*.
<https://www.fao.org/3/w2598s/w2598s05.htm>
- Osorio, N. (29 de Febrero de 2012). Uso de hongos formadores de micorriza como alternativa biotecnologica para promover la nutrición y el crecimiento de plantulas. *Manejo integral del suelo y nutrición vegetal*, 1(2), 1.
<https://www.bioedafologia.com/sites/default/files/documentos/pdf/Hongos-formadores-de-micorrizas.pdf>
- Pineda, J. (s.f). *Eutrofización*. encolombia: <https://encolombia.com/medio-ambiente/interes-a/eutrofizacion/>
- Recursos en project management. (s.f). *Matriz de decisión en proyectos*.
<https://www.rekursosenprojectmanagement.com/matriz-de-decision/>
- Reinoso, Y., & Araujo, S. (2019). Producción de biofertilizantes a partir de microalgas. *Revista del centro de estudio y desarrollo de la amazonia*, 81-87.
<https://revistas.unl.edu.ec/index.php/cedamaz/article/view/648/707>
- Rusique, M. (2010). *Desarrollo tecnológico de un biofertilizante con base en la bacteria diazotrófica Azotobacter chroocum*. Universidad Militar Nueva Granada :
<https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/13760/Documento%20tesis%20maestria%20Mauricio%20Camelo.pdf;jsessionid=3CBE0CF00C7115233D2E671CAD3FF208?sequence=2>
- Sanchez, A. (2020). Efecto de diferentes fertilizantes comerciales en el crecimiento y porcentaje de nitrógeno de dos especies de microalgas. *EAFIT*, 1.
https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/25519/Auracristina_sanchezortiz_2020.pdf?sequence=5&isAllowed=y

- Sánchez, D., Gómez, R., Garrido, M., & Bonilla, R. (2012). Inoculación con bacterias promotoras de crecimiento vegetal de tomate bajo condiciones de invernadero . *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 1401-1415. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_isoref&pid=S2007-09342012000700009&lng=es&tlng=es
- Sánchez, D., Gómez, R., Garrido, M., & Bonilla, R. (2012). Inoculación con bacterias promotoras de crecimiento vegetal en tomate bajo condiciones de invernadero. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 3(7), 1401-1415. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342012000700009
- Sánchez, G. C. (10 de 2013). *Degradación de suelos agrícolas y el SIRSD-S*. <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2013/10/SueloAgricola201310.pdf>
- Sánchez, J. (2021). Uso del hongo trichoderma (*Trichoderma* sp) como Biofertilizante en el cultivo de arroz (*Oryza Sativa* L.), Comunidad "Las Gilces-crucita". Ecuador. <http://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/3421/1/TESIS%2c%20Uso%20del%20hongo%20Trichoderma%20%28Trichoderma%20sp%29%20como%20biofertilizante%20en%20el%20cultivo%20de%20arroz%20%28Or.pdf>
- Sejzer, R. (2015). *La Matriz de pugh para la toma de decisiones*. Blogger : <http://ctcalidad.blogspot.com/2016/10/la-matriz-de-pugh-para-la-toma-de.html>
- Supraja, K., Behera, B., & Balasubramanian, P. (2020). Efficacy of microalgal extracts as biostimulants through seed treatment and foliar spray for tomato cultivation. *elsevier*. <file:///C:/Users/User/Documents/Monografia%20especializaci%C3%B3n/SCIENC EDIRECT-UAMERICA-0418.pdf>
- Torres, C. A., Etchevers, J., Fuentes, M., Govaerts, B., Gonzales, F., & Herrera, J. (2013). Influencia de las raíces sobre la agregación del suelo. *Terra latinoamericana*, 71-84. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792013000100071

Ventura, M. G., Abadia, R. H., & Navarro, T. A. (2019). La importancia de la prevención y de diagnóstico de la metahemoglobinemia en la infancia. *Acta pediátr Aten Prim*, 137. https://fapap.es/files/639-1821-RUTA/04_Puesta_al_dia_Metahemoglobinemia.pdf

Walter, C. N. (06 de Agosto de 2019). *Las nitrosaminas cancerígenas no están solo en los alimentos*. CUERPOMENTE : https://www.cuerpamente.com/ecologia/medio-ambiente/nitrosaminas-cancer_2140

Zoom. (s,f). *Fertilizantes orgánicos Vs fertilizantes inorgánicos*. IAUSA: <https://iausa.com.mx/fertilizantes-organicos-vs-fertilizantes-inorganicos/>