



c i d e t e q

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO EN
ELECTROQUÍMICA, S.C.

ESTIMULACIÓN ELÉCTRICA PARA EL INCREMENTO EN LA
GERMINACIÓN Y CRECIMIENTO DE *Cucumis sativus* EN UN
ANTROSOL EMPLEANDO ELECTRODOS MODIFICADOS CON
ÓXIDOS DE METALES DE TRANSICIÓN

Tesis

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

Maestro en Ciencia y Tecnología
en la Especialidad de Ingeniería Ambiental

PRESENTA

I.A César Pérez Morales



Santiago de Querétaro, Qro., México, agosto de 2020.



**Este trabajo fue realizado en el Centro de
Investigación y Desarrollo Tecnológico en
Electroquímica (CIDETEQ), bajo la dirección de:**

Dra. Erika Bustos Bustos.



CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Dr. Luis Antonio Ortiz Frade.
Coordinador de Posgrado.
PICYT – CIDETEQ Querétaro.
Presente.

Los abajo firmantes, miembros del Jurado de Examen de Grado del alumno CÉSAR PÉREZ MORALES, una vez leída y revisada la Tesis “**ESTIMULACIÓN ELÉCTRICA PARA EL INCREMENTO EN LA GERMINACIÓN Y CRECIMIENTO DE *Cucumis sativus* EN UN ANTROSOL EMPLEANDO ELECTRODOS MODIFICADOS CON ÓXIDOS DE METALES DE TRANSICIÓN**”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Maestro en Ciencia y Tecnología en la opción terminal de INGENIERÍA AMBIENTAL durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmó la presente el 17 del mes de agosto del año dos mil veinte.

Dr. Yunny Meas Vong
Presidente

Dr. Adrián Rodríguez García
Secretario

Dra. Carolina Martínez Sánchez
Vocal

Dra. Antonia Sandoval González
Vocal

M. en C. Sara Solís Valdez
Vocal

M. en C. Jesús Cárdenas Mijangos
Suplente

Dedicatoria

Dedico esta tesis con todo mi cariño, amor y respeto a mis abuelitas Elitania^t y Prudencia^t, en especial a mi abuelita Elitania el gran pilar de mi familia, quien siempre me brindo su amor y compartió sus historias de vida y de quien aprendí la importancia de la dedicación y perseverancia. En cada paso que doy las tengo en mi mente.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo financiero para obtener el grado de Maestro en Ciencia y Tecnología en la Especialidad de Ingeniería Ambiental.

Al Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ) por permitirme realizar mis estudios de maestría.

A mi asesora, la Dra. Erika Bustos Bustos por sus asesorías y apoyo constante para el entendimiento de este proyecto, por haberme permitido formar parte de su equipo de trabajo, además de permitirme adentrarme en el área de tratamiento de suelos, así mismo, por impulsarme a participar en congresos de los cuales obtuve un gran aprendizaje y por enseñarme que lo importante es hacer lo que nos gusta.

Al Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), en especial a la M. en C. Sara Solís Valdez por su tiempo, dedicación y apoyo en la enseñanza de la caracterización edafológica.

A la Dra. María Yolanda Reyes Vidal y al Dr. Francisco Javier Bacame Valenzuela por sus contribuciones y comentarios para el mayor entendimiento de este proyecto, así mismo, a su equipo de trabajo por apoyarme en la caracterización microbiológica.

Al Dr. Yunny Meas Vong, el Dr. Adrián Rodríguez García, la Dra. Carolina Martínez Sánchez, la Dra. Antonia Sandoval González y el M. en C. Jesús Cárdenas Mijangos por la revisión de este escrito.

A mi familia Morales por su apoyo incondicional, en especial a mi mamá, mi gran ejemplo, quien siempre confía en mí y quien me ha impulsado a cumplir mis objetivos. Así mismo, a mi abuelito y mi hermana por su apoyo en este proceso.

A mis amigos de toda la vida: Adan, Karina, Abi y Javier quienes me han apoyado y han hecho este proceso más ameno.

A mis compañeros del CIDETEQ, Yun, Karen, Lulú, Zabdiel, Eduardo, Jesús y Carlos por hacer de mi estancia en CIDETEQ algo inolvidable, en especial a Yun por su amistad, con quien siempre fui equipo y con quien superé las dificultades, por sus platicas y momentos memorables, a Zabdiel por siempre apoyarme y compartir su conocimiento, a Eduardo por sus platicas inolvidables y a Jesús por compartir su conocimiento y apoyarme resolviendo mis dudas.

A los estudiantes de estancias cortas y residencias profesionales: Jessi, Alma, Kathya, Saray y Javier por su colaboración y apoyo en el desarrollo de este proyecto, en especial a Jessi, Alma y Kathya con quienes compartí grandes momentos inolvidables.

Resumen

Los sistemas convencionales de agricultura pueden conducir a la degradación del ambiente, debido a la alta dependencia de los fertilizantes químicos y pesticidas, en este sentido es importante la búsqueda de nuevas tecnologías que ayuden a mantener el equilibrio ecológico. Un ejemplo de este tipo de nuevas tecnologías es la técnica de electrocultivo con la cual se ha demostrado que se mejoran las propiedades del suelo, así como se favorecen los procesos de germinación y crecimiento de diferentes tipos de plantas.

Es así como, el objetivo de esta investigación fue determinar el efecto que tendría la aplicación de un campo eléctrico de baja intensidad utilizando un arreglo 2D de electrodos con seis ánodos modificados de $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$ | Ti alrededor de un cátodo de Ti desnudo en las propiedades fisiológicas de las plantas de pepino, en la población microbiana presente en el suelo, así como en las propiedades fisicoquímicas del mismo.

Esta tesis se dividió en dos capítulos. En el primer capítulo se presenta el desarrollo del electrocultivo a nivel laboratorio utilizando celdas con 0.0038 m^3 de suelo, en donde se demostró que al emplear el electrocultivo se obtuvo un mayor porcentaje de germinación (50 %) que con solo desarrollar el cultivo (30 %). En el segundo capítulo se presenta el escalamiento de esta tecnología desarrollando el electrocultivo a nivel piloto *in situ* en 5.4 m^3 de suelo, considerando los mejores resultados obtenidos previamente a nivel laboratorio, comprobando nuevamente que el electrocultivo mostró una mayor germinación (59 %) que el cultivo (41 %), lo cual valida la eficiencia de la estimulación eléctrica de las semillas de pepino en un Antrosol.

Finalmente, a nivel laboratorio y piloto al caracterizar las propiedades fisiológicas de las plantas de pepino como: grosor de tallo, elongación de tallo, longitud de cotiledón, tamaño de hoja verdadera, longitud de raíz y cantidad de biomasa generada incrementaron al estimular eléctricamente a las semillas de pepino con el electrocultivo, específicamente en el área cercana a los ánodos comparado con el cultivo.

Abstract

Conventional agriculture systems can lead to environmental degradation due to the high dependence on chemical fertilizers and pesticides. In this sense, it is essential to search for new technologies that help maintain the ecological balance. An example of this type of new technology is the electrofarming technique, which has shown that soil properties are improved and the germination and growth processes of different types of plants.

This research objective was to determine the effect that the application of a low-intensity electric field would have using a 2D electrode arrangement with six modified IrO₂-Ta₂O₅|Ti anodes around a bare Ti cathode on the physic-chemical properties of cucumber plants, and the microbial population present in the soil.

This thesis is into two chapters. In the first chapter, the development of electrofarming at the laboratory level using cells with 0.0038 m³ of soil demonstrated that using the electrofarming obtained a higher percentage of germination (50 %) than just developing the farming (30 %). In the second chapter, the scaling of electrofarming at a pilot level *in situ* in 5.4 m³ of soil, considering the best results previously obtained at the level laboratory, again verifying that the electrofarming showed higher germination (59 %) than the farming (41 %), which validates the efficiency of the electrical stimulation of cucumber seeds in Antrosol.

Finally, at the laboratory and pilot level, by characterizing the physiological properties of cucumber plants, such as: stem thickness, stem elongation, cotyledon length, true leaf size, root length and amount of biomass generated, they increased by stimulating electrically to cucumber seeds with the electrofarming, specifically in the area close the anodes compared to the farming.

Nomenclatura

Símbolo	Significado
1D	Una dimensión
2D	Dos dimensiones
DSA®	Ánodo Dimensionalmente Estable
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
SIAP	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera
CA	Cerca del ánodo
MC	Media celda
CC	Cerca del cátodo
C	Cultivo
SC	Suelo control
CIC	Capacidad de Intercambio Catiónico
ISSS	International Soil Science Society
MO	Materia orgánica
Ti	Titanio
NOM	Norma Oficial Mexicana
ONU	Organización de las Naciones Unidas
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos
WRB	Referencial Mundial del Recurso Suelo

Índice

Dedicatoria	i
Agradecimientos	ii
Resumen	iv
Abstract	v
Nomenclatura	vi
1 Introducción	1
2 Marco Teórico	3
2.1 Suelo	4
2.2 Formación de suelos	5
2.3 Composición de suelos	6
2.4 Clasificación de suelos	7
2.5 Caracterización de los suelos	11
2.5.1 Propiedades físicas del suelo	11
2.5.1.1 Clase textural	11
2.5.1.2 Estructura	13
2.5.1.3 Densidad	14
2.5.2 Propiedades químicas del suelo	14
2.5.2.1 Conductividad eléctrica	15
2.5.2.2 pH	15
2.5.2.3 Capacidad de Intercambio Catiónico	16
2.5.2.4 Materia orgánica	16
2.5.3 Propiedades biológicas del suelo	18
2.5.3.1 Bacterias	20
2.5.3.2 Hongos	22
2.5.3.3 Enzimas del suelo	24
2.6 Crecimiento de plantas	26
2.7 Sistema de producción sostenible de cultivos	32
2.8 Electrocultivo	33

2.8.1 Electroodos.....	36
2.8.2 Configuración de electrodos.....	37
2.9 Pepino (<i>Cucumis sativus</i>)	38
3 Antecedentes.....	44
4 Justificación	48
5 Hipótesis.....	50
6 Objetivos.....	52
6.1 Objetivo General.....	53
6.2 Objetivos específicos	53
7 Metodología General	54
7.1 Preparación de material.....	56
7.1.1 Acondicionamiento de semillas	56
7.1.2 Acondicionamiento de la muestra de suelo	56
7.1.3 Electroodos.....	57
7.2 Electrocultivo	57
7.2.1 Caracterización fisiológica de las plantas de pepino	57
7.2.2 Caracterización microbiológica del suelo	57
7.2.3 Caracterización edafológica.....	58

CAPITULO 1

Desarrollo del electrocultivo de *Cucumis sativus* empleando electrodos modificados con óxidos de metales de transición a nivel laboratorio en un Vertisol pélico.

I.1 Introducción	60
I.2 Materiales y métodos.....	61
I.2.1 Activación de electrodos	61
I.2.1.1 Montaje de celda electroquímica.....	61
I.2.2 Toma de muestra de suelo	62
I.2.2.1 Electrocultivo de <i>Cucumis sativus</i>	62
I.2.3 Caracterización fisiológica de las plantas de <i>Cucumis sativus</i>	64
I.2.4 Caracterización microbiológica del suelo	65
I.2.4.1 Recuento en placa	65
I.2.4.2 Aislamiento de bacterias y hongos.....	66

I.2.4.3 Caracterización macro y microscópica de bacterias y hongos	66
I.2.5 Caracterización edafológica	66
I.2.6 Procesamiento de datos y análisis estadístico	67
I. 3 Resultados y discusión	68
I.3.1 Caracterización fisiológica de <i>Cucumis sativus</i>	68
I.3.2 Caracterización microbiológica	80
I.3.3 Caracterización edafológica	87
I.4 Conclusiones parciales	93

CAPITULO 2

Desarrollo del electrocultivo *in situ* de *Cucumis sativus* empleando electrodos modificados con óxidos de metales de transición a nivel piloto en un Antrosol.

II.1 Introducción	95
II.2 Materiales y métodos	96
II.2.1 Preparación del material	96
II.2.2 Electrocultivo de pepino (<i>Cucumis sativus</i>)	97
II.2.3 Caracterización fisiológica de las plantas de pepino	100
II.2.4 Toma de muestras de suelo para su caracterización	100
II.2.5 Caracterización microbiológica del suelo	101
II.2.5.1 Inoculación de muestras de suelo en placas	101
II.2.5.2 Recuento en placa	102
II.2.5.3 Aislamiento de bacterias y hongos.....	102
II.2.5.4. Caracterización macroscópica de bacterias y hongos.....	102
II.2.5.5 Caracterización microscópica de bacterias y hongos	102
II.2.6 Caracterización edafológica	103
II.2.7 Procesamiento de datos y análisis estadístico	103
II.3 Resultados y discusión	104
II.3.1 Caracterización fisiológica de <i>Cucumis sativus</i>	104
II.3.2 Caracterización microbiológica del suelo	115
II.3.3 Caracterización edafológica	125
II.4 Conclusiones parciales	132
8 Conclusiones Generales	133

9 Referencias	137
10 Productos científicos.....	149

Índice de Tablas

Tabla 1. Grupo de suelos del sistema de clasificación WRB.	8
Tabla 2. Clasificación de suelo de acuerdo a las dimensiones de partículas.	12
Tabla 3. Contribución de la materia orgánica en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.	17
Tabla 4. Clasificación de los organismos del suelo según su tamaño.....	19
Tabla 5. Forma común de los elementos esenciales absorbidos por las raíces de las plantas y su contenido en materia seca para un adecuado crecimiento.	28
Tabla 6. Taxonomía del pepino.	38
Tabla 7. Deficiencias nutricionales en las plantas de pepino.	41
Tabla 8. Análisis estadístico de varianza (ANOVA) ($\alpha = 0.05$) de cada una de las propiedades fisiológicas de las plantas de pepino.	70
Tabla 9. Resultados de la Prueba Tukey para el caso de bacterias del electrocultivo, control y cultivo.....	82
Tabla 10. Resultados de la Prueba Tukey para el caso de hongos del electrocultivo,	84
Tabla 11. Caracterización macro y microscópica de bacterias.	85
Tabla 12. Resultados de bacterias en porcentaje por clasificación.	86
Tabla 13. Caracterización macro y microscópica de hongos.	87
Tabla 14. Resultados de la caracterización edafológica antes y después del electrocultivo así como, los resultados obtenidos de la prueba Tukey.	88
Tabla 15. Análisis estadístico de varianza (ANOVA) ($\alpha = 0.05$) de cada una de las propiedades fisiológicas de las plantas de pepino del electrocultivo y el cultivo.....	106
Tabla 16. Resultados de la Prueba Tukey para el caso de bacterias del electrocultivo, SC y C.....	118
Tabla 17. Resultado de la Prueba Tukey para el caso de hongos del electrocultivo,	120
Tabla 18. Caracterización macro y microscópica de bacterias.	121
Tabla 19. Caracterización macro y microscópica de hongos.	123
Tabla 20. Valores generales de la caracterización edafológica antes y después del desarrollo del electrocultivo.....	127

Índice de Figuras

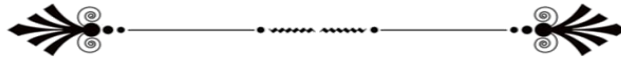
Figura 1. Horizontes del suelo.....	5
Figura 2. Componentes del suelo.....	7
Figura 3. Distribución de los tipos de suelos de la República Mexicana.....	9
Figura 4. Perfil de un Vertisol (A), y grietas formadas en la superficie de este suelo debido a la falta de humedad	10
Figura 5. Triángulo de clase textural	13
Figura 6. Organismos presentes en los diferentes horizontes del suelo	18
Figura 7. Microorganismos fundamentales del suelo: (A) hongos, (B) bacterias y (C) actinomicetos.....	19
Figura 8. Estructura bacteriana (B) Gram (+) y Gram (-) con su respectiva pared celular (A)	21
Figura 9. Estructura de una hifa y los organelos que la conforman (A) así como, la fisiología del micelio, y la representación de una hifa, la cual está formada por células separadas por paredes cruzadas (septo) todas encerradas dentro de una pared celular (B)	23
Figura 10. Representación esquemática de una célula vegetal.....	26
Figura 11. Representación de los nutrientes esenciales para las plantas.....	27
Figura 12. Absorción de nutrientes del suelo por las plantas.....	29
Figura 13. Representación esquemática de los fenómenos ocurridos durante la aplicación de la técnica de electrocultivo	33
Figura 14. Ejemplo de arreglo 1D (A) y arreglo 2D hexagonal, cuadrado y triangular (B) 37	
Figura 15. Etapas de crecimiento del pepino.....	40
Figura 16. Distribución de las principales hortalizas producidas bajo cubierta en México	42
Figura 17. Principales entidades productoras de pepino en 2019	42
Figura 18. Representación gráfica de la estacionalidad de la producción de pepino en México	43
Figura 19. Metodología general del electrocultivo de <i>Cucumis sativus</i>	55
Figura 20. Metodología general del acondicionamiento de las semillas de pepino.....	56
Figura 21. Montaje de la celda electroquímica para la activación de electrodos.....	61

Figura 22. Celda electroquímica utilizada durante el electrocultivo (A) con la correspondiente ubicación de las semillas de pepino y electrodos (B), utilizando una configuración 2D de electrodos conectados a una fuente de poder (C).	63
Figura 23. Cámara de crecimiento utilizada durante el electrocultivo a nivel laboratorio. 64	
Figura 24. Porcentaje de germinación de semillas de pepino (A), comparando el electrocultivo con el cultivo durante los 14 días de la etapa de seguimiento (B).	68
Figura 25. Comparación de la tasa de germinación entre el electrocultivo y el cultivo transcurridos los 14 días experimentales.	70
Figura 26. Comparación gráfica del grosor del tallo de las plantas de pepino entre el electrocultivo y el cultivo.	71
Figura 27. Representación del grosor del tallo de las plantas de pepino en las distintas zonas del electrocultivo (A) y cultivo (B) después de 14 días experimentales.	72
Figura 28. Comparación gráfica de la longitud de los cotiledones de las plantas de pepino, con respecto a los días entre el electrocultivo y el cultivo.	72
Figura 29. Representación de la longitud de los cotiledones de las plantas de pepino en las diferentes zonas del electrocultivo (A) y del cultivo (B) transcurridos los 14 días experimentales.	73
Figura 30. Representación gráfica de la elongación del tallo de las plantas del electrocultivo y el cultivo con respecto a los días.....	74
Figura 31. Representación de la ubicación y elongación de los tallos de las plantas de pepino del electrocultivo (A) y cultivo (B) en el día 14; coordenada 1D ().....	75
Figura 32. Representación gráfica (A) y distribución de las dimensiones de las hojas verdaderas entre el electrocultivo (B) y el cultivo (C) al día 14.....	76
Figura 33. Representación gráfica de la longitud de las raíces obtenidas entre el electrocultivo y el cultivo transcurridos los 14 días experimentales.	77
Figura 34. Fotografía de las plantas obtenidas en las diferentes regiones de la celda del electrocultivo y en el cultivo (A) y su distribución en las celdas del electrocultivo (B) y el cultivo (C).	78
Figura 35. Representación gráfica de la biomasa obtenida entre el electrocultivo y el cultivo (A), y su distribución en las diferentes zonas de la celda del electrocultivo (B) y el cultivo (C).	79
Figura 36. Representación gráfica de las UFC de bacterias obtenidas en el electrocultivo y en el cultivo (A), así como su distribución en la celda (B).	81
Figura 37. Representación gráfica de las UFC de hongos obtenidas en el electrocultivo y el cultivo (A), así como, su distribución en la celda (B).	83
Figura 38. Representación de la distribución de las propiedades edafológicas: pH (A), MO (B), CIC (C) y PO_4^{2-} (D), entre el electrocultivo y el cultivo.	91

Figura 39. Representación de la distribución de los cationes intercambiables: Ca ²⁺ (A), Mg ²⁺ (B), K ⁺ (C) y la actividad enzimática (D) entre el electrocultivo y el cultivo.	92
Figura 40. Ubicación satelital del punto en donde se desarrolló el electrocultivo a nivel piloto dentro de las instalaciones del CIDETEQ (A) que tiene un Antrosol (B).	96
Figura 41. Superficie para el desarrollo del electrocultivo a nivel piloto <i>in situ</i>	96
Figura 42. Ubicación de los electrodos para el electrocultivo en la zona de estudio (A), para lo cual se efectuaron las perforaciones en el suelo (B y C) para la incorporación de los electrodos al mismo (D).	97
Figura 43. Dimensiones de los electrodos (A) insertados directamente en el suelo (B) para desarrollar el electrocultivo de pepino a nivel piloto en un Antrosol (C).	99
Figura 44. Implementación de sistema de riego en el área asignada para electrocultivo (A) y el cultivo (B).	99
Figura 45. Fotografía de las plántulas de pepino del electrocultivo (A, B) y del cultivo (C, D).....	104
Figura 46. Representación gráfica del porcentaje de germinación de semillas de pepino en el electrocultivo y el cultivo.....	105
Figura 47. Representación de la ubicación de semillas de pepino germinadas y sin germinar transcurridos los 18 días experimentales de electrocultivo (ánodo = +; cátodo = -) y cultivo.	105
Figura 48. Comparación gráfica del grosor del tallo de las plántulas de pepino entre el electrocultivo y el cultivo.	107
Figura 49. Representación de la distribución y dimensiones del grosor del tallo de las plántulas de pepino del electrocultivo (A), y cultivo (B).	108
Figura 50. Comparación gráfica de la elongación del tallo de las plántulas de pepino del electrocultivo y el cultivo, registradas desde el día 11 al día 18.	108
Figura 51. Representación de la distribución y dimensiones de la elongación del tallo de las plántulas de pepino del electrocultivo (A), y cultivo (B).	109
Figura 52. Comparación gráfica de la longitud de los cotiledones de las plántulas de pepino del electrocultivo y cultivo.	110
Figura 53. Representación de la distribución y dimensiones de los cotiledones de las plántulas de pepino del electrocultivo (A), y cultivo (B).	110
Figura 54. Comparación gráfica de la longitud de las raíces de las plántulas de pepino entre el electrocultivo y el cultivo.....	111
Figura 55. Representación de la distribución y longitud de la raíz de las plántulas de pepino del electrocultivo (A) y cultivo (B).	112
Figura 56. Fotografías de las plántulas de pepino obtenidas en el electrocultivo (A) y en el cultivo (B) con su correspondiente longitud de raíz.	113

Figura 57. Comparación gráfica de la biomasa total obtenida en las plántulas de pepino entre el electrocultivo y el cultivo.....	114
Figura 58. Representación de la distribución y biomasa total generada por las plántulas de pepino del electrocultivo (A) y cultivo (B).	114
Figura 59. UFC de bacterias (A) obtenidas en cada área del electrocultivo antes y después del tratamiento, así como del cultivo (B).	117
Figura 60. UFC de hongos (A) obtenidas en cada área del electrocultivo y cultivo antes y después del tratamiento (B).	119
Figura 61. Representación de la distribución de las propiedades edafológicas: pH (A) y MO (B) entre el electrocultivo y el cultivo.	128
Figura 62. Representación de la distribución de las propiedades edafológicas: CIC (A) y actividad enzimática (B) entre el electrocultivo y el cultivo.	129
Figura 63. Representación de la distribución de los cationes intercambiables: Ca ²⁺ (A) y Mg ²⁺ (B) entre el electrocultivo y el cultivo.	130
Figura 64. Representación de la distribución de los cationes intercambiables: Na ²⁺ (A) y K ⁺ (B) entre el electrocultivo y el cultivo.	131
Figura 65. Representación de las propiedades estadísticamente diferentes en las distintas áreas del electrocultivo: CA, MC y CC.	135

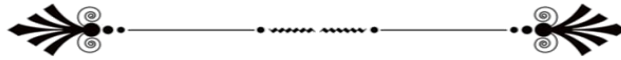
INTRODUCCIÓN



El suelo es considerado la base para la supervivencia, desarrollo y permanencia humana [1]. Sin embargo, los recientes desafíos sociales, como el crecimiento poblacional y el desarrollo industrial, han generado un efecto negativo significativo en el medio ambiente [2]. En este sentido, en los próximos 35 años, debido a un aumento del 30 % de la población mundial, se prevé que la agricultura será sometida a una presión sin precedentes, se necesitarán duplicar los niveles de producción para la creciente población y existirán cambios drásticos en los sistemas alimentarios y agrícolas [3]. Por lo tanto, el desarrollo de tecnologías se ha vuelto necesario para mejorar el proceso de producción de alimentos y reducir el tiempo para obtenerlos. Las investigaciones realizadas por distintos autores demuestran que se tienen efectos positivos en las plantas al aplicar un campo eléctrico (corriente directa y/o alterna) para su germinación y crecimiento [4–8].

Asimismo, se ha demostrado que distintas especies de plantas son adecuadas con diferentes requisitos óptimos de campos eléctricos para promover su crecimiento [1]. Sin embargo, las investigaciones con respecto a los efectos del campo eléctrico en las plantas son aún limitadas, no está claro si los campos eléctricos podrían considerarse inductores de estrés abiótico a las plantas [6]. La finalidad de esta investigación fue proponer una alternativa tecnológica mediante la técnica de electrocultivo utilizando electrodos modificados con óxidos de metales de transición en un Vertisol pélico, con los cuales se estimularon las semillas de pepino aplicando un campo eléctrico, beneficiando los porcentajes de germinación y crecimiento de las plantas, así como la actividad microbiana y las propiedades fisicoquímicas del suelo a nivel laboratorio; a nivel piloto se seleccionó un sitio dentro de las instalaciones del CIDETEQ en donde se tenía originalmente un Vertisol pélico [25], el cual fue modificado por actividades antropogénicas.

MARCO TEÓRICO



2.1 Suelo

Se define suelo a la capa superficial no consolidada de la superficie terrestre, que se encuentra formada principalmente por compuestos inorgánicos (hasta más del 99 %), con un porcentaje variable de compuestos orgánicos [9]. Existen diversas definiciones de suelo, a continuación, se presentan algunas de ellas:

1. Compilación de cuerpos naturales formados por sólidos (minerales y orgánicos), líquidos y gases sobre la superficie terrestre. Presenta horizontes, que se diferencian del material de origen debido a transformaciones físicas y/o químicas [10].
2. Capa delgada que se ha formado lentamente, a través del tiempo, con la desintegración de las rocas superficiales debido a la acción del agua, cambios de temperatura y viento. Es una mezcla compleja de compuestos minerales, materia orgánica, microorganismos, animales, aire y agua [11].
3. Cuerpo natural continuo, con tres dimensiones espaciales y una temporal, con tres características principales [12]:
 - Está formado por constituyentes minerales y orgánicos e incluye la fase sólida, líquida y gaseosa.
 - Sus constituyentes están organizados en estructuras, específicas para el medio edáfico.
 - El suelo se encuentra en constante evolución, lo que genera su cuarta dimensión, el tiempo.

2.2 Formación de suelos

Los estudios en todo el mundo han demostrado que la formación de los distintos tipos de suelos se encuentran controlados en gran medida por cinco factores principales [18]: clima (particularmente temperatura y precipitación), organismos (especialmente vegetación endógena), relieve, material parental (textura y estructura, composición química y mineralógica) y tiempo, que ejercen sus efectos de forma individual y combinada de manera simultánea. Por lo que, las propiedades del suelo dependen del resultado de las interacciones de estos [13]. Un horizonte de suelo se desarrolla a través de procesos complejos pedogénicos que interactúan bajo las condiciones ambientales y transmiten información sobre las condiciones del suelo pasadas. En todos los suelos, especialmente en los maduros se pueden distinguir los materiales que lo componen dividiéndose en niveles u horizontes, los cuales permiten su clasificación y estudio.

Generalmente, se denotan cinco horizontes bien diferenciados que se denominan horizontes maestros y se identifican por las letras: O, A, E, B y C [13], su delimitación está establecida por la variación lateral y vertical de las propiedades del suelo [14]. Las características de los horizontes o capas del suelo se analizan detalladamente mediante un perfil de suelo, el cual se muestra representado en la Figura 1.

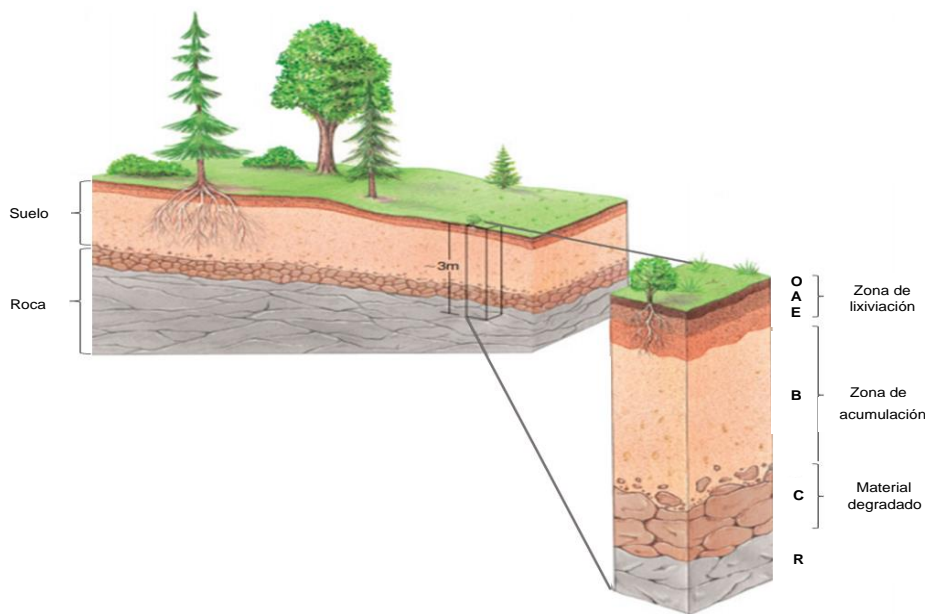


Figura 1. Horizontes del suelo (figura adaptada de [15]).

El horizonte O se desarrolla a partir de residuos de plantas y animales muertos [13], este horizonte es frecuentemente color marrón o negro [15]. El horizonte A es un horizonte mineral formado sobre la superficie o debajo del horizonte O; contiene humus mezclado con la materia mineral [13]. La lixiviación de materiales debida a la percolación del agua subterránea u otro líquido ocurre en este horizonte (por lo que constituye la zona de lixiviación junto con el horizonte E), ocasionando el movimiento de arcilla y otros materiales como el hierro y calcio al horizonte B [15]. Por su parte, el horizonte E se encuentra por debajo del horizonte A en climas húmedos y puede no distinguirse claramente en todos los perfiles de suelo; puede presentar colores claros (grisáceo a blanquecino) resultantes de la lixiviación de la arcilla, calcio, hierro y magnesio [13,15]. El horizonte B es considerado la zona de acumulación de materiales extraídos de los horizontes superiores [13], se encuentra enriquecido en arcilla, óxidos de hierro, sílice y carbonatos [15]. El horizonte C puede estar compuesto de material parental parcialmente degradado; este horizonte puede presentar color rojo por los óxidos de hierro [15]. El horizonte R representa la roca sólida (roca madre) que no es parte del suelo y que no ha sido modificada o alterada por los procesos de meteorización [15].

2.3 Composición de suelos

Los suelos están compuestos principalmente por tres fases [16] como se muestra en la Figura 2.

Fase sólida: agregados minerales (primarios y secundarios derivados del material original) y orgánicos (restos de plantas y animales y organismos vivos, generalmente < 5 %).

Fase líquida: solución acuosa diluida de compuestos inorgánicos y orgánicos como: Na, K, Ca, Mg, Cl, NO₃, PO₄, y SO₄.

Fase gaseosa: conocida como la atmósfera del suelo contenida en el espacio poroso (importante para la respiración de los organismos), que comprende la mezcla de algunos gases principales como N₂, O₂ y trazas de CO₂, CH₄ y ON.

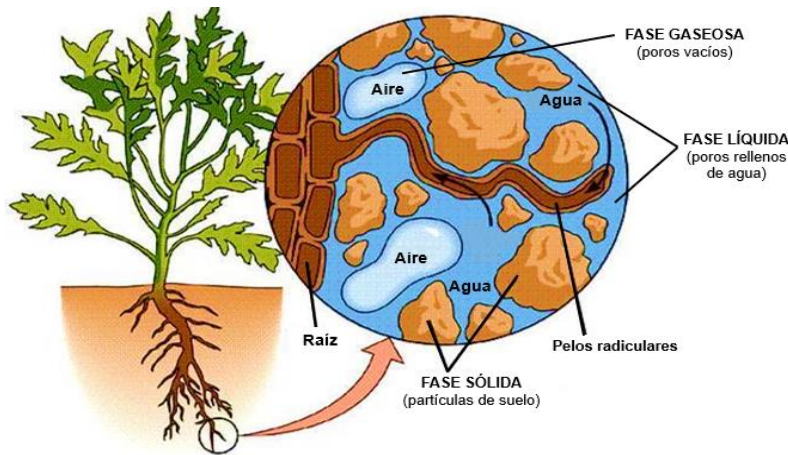


Figura 2. Componentes del suelo (figura adaptada de [17]).

Del volumen total del suelo aproximadamente 50 % corresponde a sólidos (45 % de material mineral y el 5 % de materia orgánica) y 50 % de espacios en los poros (25 % agua y 25 % aire) en condiciones de humedad óptimas para el crecimiento de las plantas y están sujetos a las condiciones naturales, dependiendo sobre todo del clima y otros factores [18]. Para la mayoría de los cultivos, los suelos que tienen entre un 10 % y 15 % de aire son considerados bien aireados. Sin embargo, existen grandes variaciones entre los requerimientos de cada planta, por ejemplo, los cultivos de frijol requieren hasta un 25 % de aire para su producción óptima [9].

2.4 Clasificación de suelos

Dependiendo de sus características genéticas, químicas, mineralógicas y físicas, los suelos para su estudio se dividen en clases originando su clasificación. El objetivo principal de los sistemas de clasificación consiste en agrupar diferentes tipos de suelos con características similares para proporcionar un método sistemático para describirlos. Los sistemas más comunes los agrupan de manera ordenada y sistemática, en clases, con propiedades similares que permiten identificarlos fácilmente [19]. Generalmente, los criterios utilizados en la clasificación de suelos son de tres tipos: (a) tipo y dimensiones de las partículas del suelo; (b) origen del suelo y (c) uso del suelo.

En México, el sistema de clasificación utilizado es el de la WRB que tiene como objetivo facilitar la implementación de inventarios de suelos y la interpretación de mapas de suelos. La primera edición de la WRB (1988), integro 30 Grupos de Suelos de Referencia (GSR); la segunda edición (2006), y la actual (tercera edición) publicada en 2014 propuso una actualización al número de GSR, pasando a 32 grupos [12], los cuales se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Grupo de suelos del sistema de clasificación WRB [12].

Grupo	Condiciones Principales del Suelo
Histosoles	Capas orgánicas gruesas.
Antrosoles, Tecnosoles	Fuerte influencia humana.
Criosoles, Leptosoles, Solonetz, Vertisoles, Solonchacks	Enraizamiento limitado.
Greysoles, Andosoles, Podzoles, Plintosoles, Nitisoles, Ferralsoles, Planosoles, Stagnosoles	Regulados por la química de Fe/Al.
Chernozems, Kastanozems, Phaeozems, Umbrisoles	Grandes cantidades de materia orgánica en el suelo mineral superficial.
Durisoles, Gipsisoles, Calcisoles	Acumulación de sales moderadamente solubles o de sustancias no salinas.
Retisoles, Acrisoles, Lixisoles, Alisoles, Luvisoles	Enriquecidos en arcillas en la parte subsuperficial.
Cambisoles, Arenosoles, Fluvisoles, Regosoles	Con poca o ninguna diferenciación del perfil.

En México existe una gran diversidad edáfica representada por 26 de los 32 grupos de suelos reconocidos por el WRB [12]. Sin embargo, el territorio nacional se encuentra dominado sólo por seis grupos: Leptosoles (28.3 %), Regosoles (13.7 %), Phaeozems (11.7 %), Calcisoles (10.4 %), Luvisoles (9 %) y Vertisoles (8.6 %), que en conjunto ocupan el 81.7 % de la superficie nacional [23,24].

En el 52.4 % del territorio nacional se encuentran suelos someros o poco desarrollados: Leptosoles (54.3 millones de ha), Regosoles (26.3 millones de ha) y Calcisoles (20 millones de ha), lo cual dificulta su potencial para aprovechamiento agrícola. Los suelos con mayor fertilidad lo conforman los Phaeozems, Luvisoles y Vertisoles (22.5, 17.3 y 16.5 millones de ha, respectivamente) que ocupan en conjunto el 29.3 % del territorio nacional. En el resto del territorio (aproximadamente 35 millones de ha) se encuentran los otros 20 grupos edáficos, los cuales se distribuyen en un gran número de relieves, microclimas y diferentes tipos de vegetación [24], como se muestra en la Figura 3.

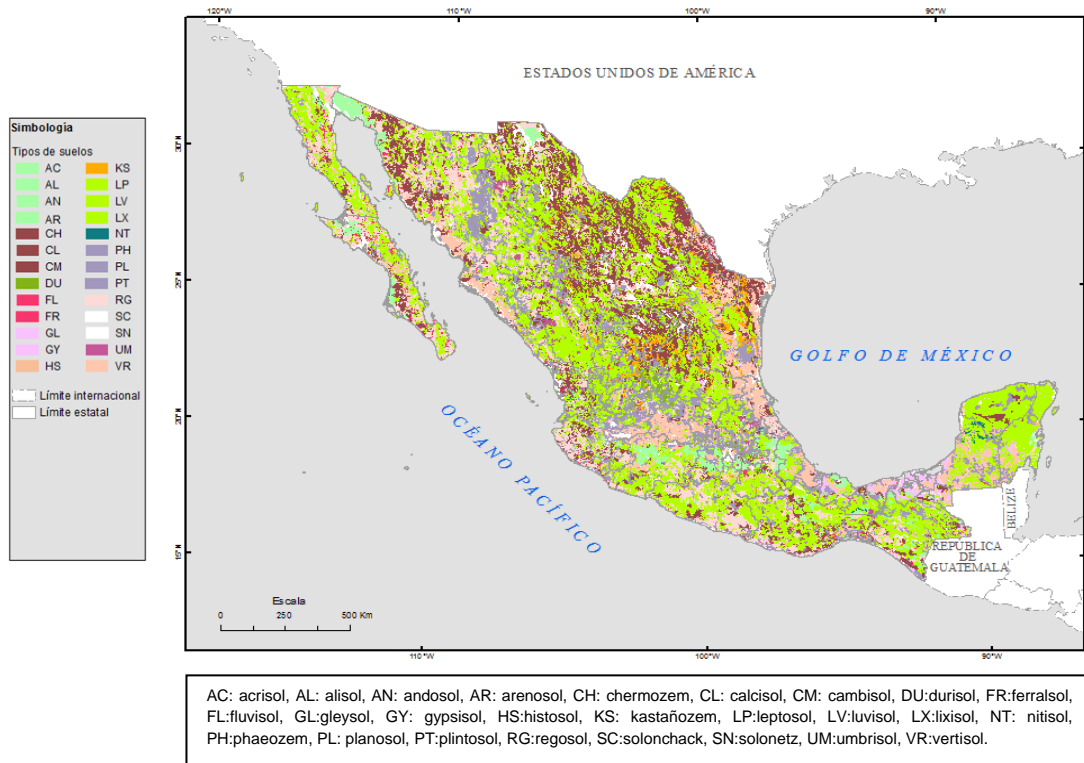


Figura 3. Distribución de los tipos de suelos de la República Mexicana [25].

Los Vertisoles (del latín verteré, revolver) [12] son uno de los suelos más productivos en México y el mundo [26], se desarrollan en climas de subhúmedos a secos, tienen un gran potencial agrícola debido a su buena fertilidad química [12] y alta capacidad de intercambio catiónico y retención de humedad [26]. Estos suelos se encuentran frecuentemente en posiciones bajas del paisaje como en el fondo de los lagos secos, cuencas hidrográficas, terrazas inferiores de ríos, y otros sitios que se encuentran húmedos en su estado natural [12]. Presentan entre 50 % - 70 % de arcilla con una proporción relativamente grande de

arcilla fina [13]. Las arcillas son predominantemente esmectíticas, generalmente se trata de montmorillonita, por lo que al secarse genera grietas verticales anchas y profundas (Figura 4A y Figura 4B). Además, estos suelos son de color gris oscuro (de negro a pardo-rojizo) [21]. La mayoría de los Vertisoles se adaptan bien a la agricultura si existen condiciones adecuadas de lluvia o agua de riego [13].

Los usos agrícolas de este tipo de suelo van desde muy extensivos como: pastoreo y quema de carbón hasta su aplicación en la agricultura bajo riego a pequeña escala (arroz) y gran escala (algodón, trigo, cebada, sorgo, garbanzo, lino y caña de azúcar) [12], además son excelentes para la producción de hortalizas como cebolla, sandía, jitomate y melón [26]. Las prácticas de manejo para la producción de cultivos en un Vertisol debe incluir el control del agua, debido a que las propiedades físicas (textura y tasa de infiltración) de estos suelos pueden presentar limitaciones de manejo [12].

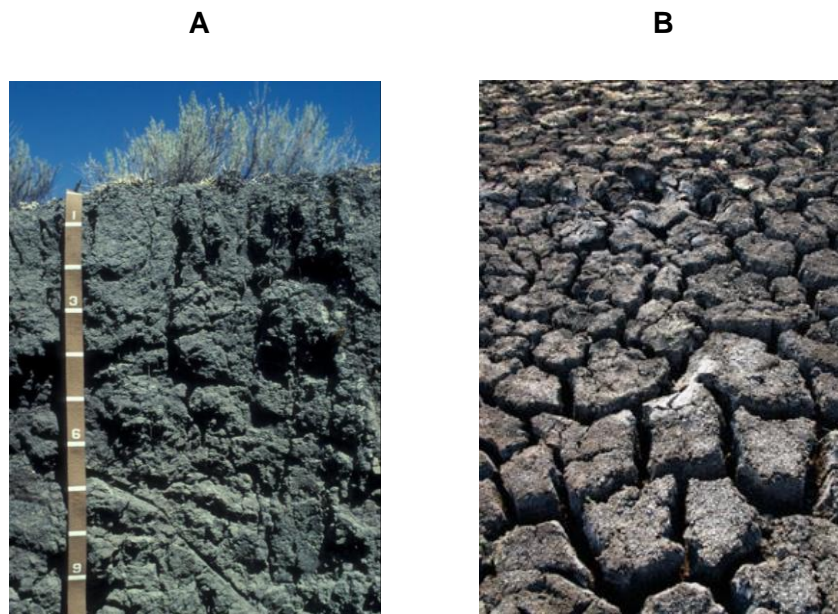


Figura 4. Perfil de un Vertisol (A), y grietas formadas en la superficie de este suelo debido a la falta de humedad (B) [27].

2.5 Caracterización de los suelos

2.5.1 Propiedades físicas del suelo

Las propiedades físicas del suelo tienen un papel importante en la determinación de su calidad para usos agrícolas, ambientales e incluso de ingeniería [28]. Las propiedades físicas del suelo en la actualidad son tema de interés para mantener la productividad agrícola mundial debido a la disminución de la superficie de tierra cultivable [16]. La disponibilidad, movilidad y retención de agua, nutrientes para plantas, facilidad de penetración de las raíces, así como el flujo de calor y aire se encuentran directamente relacionados con las propiedades físicas que un suelo presenta [28].

El conocimiento profundo de las propiedades físicas de un suelo es determinante para el entendimiento del uso eficiente de los recursos de agua y nutrientes, así como de la aplicación de tecnologías para su mejoramiento, las cuales también influyen en las propiedades químicas y biológicas del suelo [28]. Las propiedades físicas del suelo más importantes para la sostenibilidad agrícola son textura, estructura, y densidad, las cuales se detallan a continuación [28].

2.5.1.1 Clase textural

La textura del suelo se refiere al rango de tamaño prominente de partículas, y se define cuantitativamente [28,29]. Tomando en cuenta el tamaño promedio de las partículas que forman la fracción fina del suelo se pueden clasificar en arena, limo y arcilla [13] con base en la ISSS y USDA, lo cual se representa en la Tabla 2. La distinta proporción de arena, limo y arcilla define la textura de cada horizonte [10,21].

Tabla 2. Clasificación de suelo de acuerdo a las dimensiones de partículas [13].

Sistema ISSS		Sistema USDA		Propiedad
Partículas del suelo	Diámetro (mm)	Partículas del suelo	Diámetro (mm)	
Arena gruesa	0.20-2.0	Arena muy gruesa	1.0-2.0	Visibles a simple vista; poca o nula capacidad para retener agua o nutrientes.
Arena fina	0.02-0.20	Arena gruesa	0.50-1.0	
		Arena muy fina	0.05-0.10	
Limo	0.002-0.02	Limo	0.002-0.05	La mayoría de las partículas de limo no son visibles a simple vista; tiene de baja a media capacidad para retener agua, nutrientes y otras partículas.
Arcilla	< 0.002	Arcilla	< 0.002	Solo se pueden observar a través de un microscopio electrónico; tienen alta capacidad para retener agua, nutrientes y otras partículas.

Una vez calculados los porcentajes de cada partícula se utiliza el método de clasificación de la USDA [21], en donde los términos texturales se definen de una manera gráfica basados en el Diagrama Triangular de Texturas en donde se representan las tres fracciones (% de arena, % limo y % arcilla), mostrado en la Figura 5.

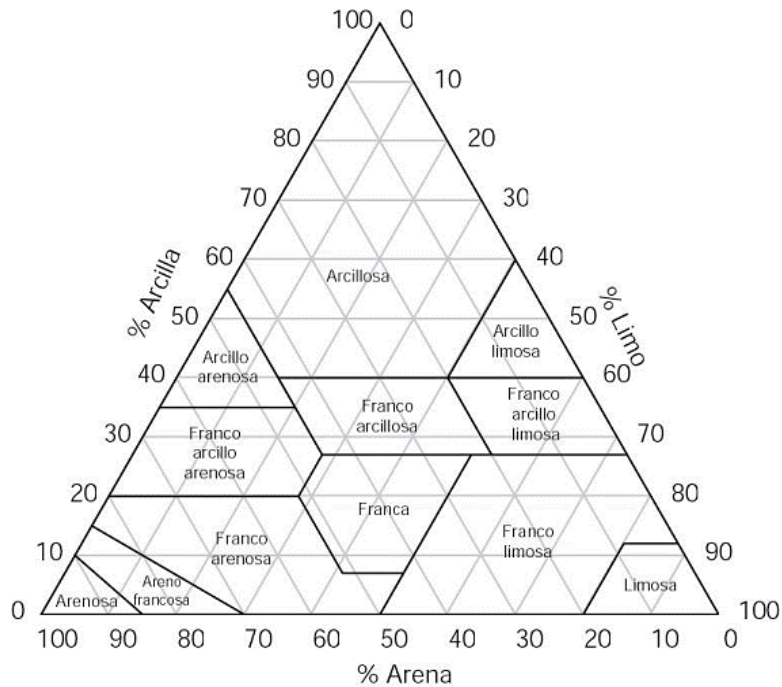


Figura 5. Triángulo de clase textural [30].

2.5.1.2 Estructura

La estructura de un suelo describe la manera de agregarse de las partículas del suelo en unidades de mayor tamaño (agregados cuya forma puede ser laminar, prismática o en bloques) y el espacio de hueco asociado a ellas [21]. La manera de agregarse da como resultado la formación de poros de distintos tamaños [28].

En los suelos que presentan una estructura bien desarrollada, al secarse, aparecen líneas de fisuración entre cada agregado, en este caso, se dice que el grado de estructuración o pedialidad se encuentra fuertemente desarrollado, los cuales son relativamente resistentes a los procesos de humectación-deseccación [21], por lo que, se disminuye la capacidad de movilidad de partículas por el agua o viento, lo que reduce la escorrentía y la erosión del suelo [28].

La estructura del suelo influye directamente en casi todos los factores de crecimiento de las plantas: suministro de agua, aireación, disponibilidad de nutrientes, calor, penetración de la raíz y actividad microbiana, principalmente. De igual manera, existen factores físicos (humectación y secado), químicos (cationes intercambiables: Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+), y

biológicos (compuestos excretados de las raíces de las plantas, algas, bacterias, hongos, actinomicetos y animales pequeños como: lombrices, ácaros, nematodos, insectos) que influyen en la formación y estabilidad de la estructura del suelo [28].

2.5.1.3 Densidad

La densidad del suelo es la relación entre la masa y el volumen de una muestra de suelo seco [31]. Para expresar la densidad del suelo se usan dos términos: la densidad real, en donde se incluye la densidad de las partículas del suelo, y la densidad aparente, la cual se refiere a la densidad del suelo en su estado natural, incluyendo las partículas y el espacio entre los poros [32]. Para la determinación de la densidad real se utiliza el método del picnómetro, el cual consiste en obtener el volumen de una muestra de suelo en forma indirecta, determinando el volumen de agua existente en un picnómetro con y sin muestra de suelo [21].

Por su parte, para la determinación de la densidad aparente, el método más común por su sencillez y costo es la toma de muestra tipo Uhland [33], el cual consiste en insertar cilindros de paredes delgadas y rígidas, en la profundidad media de la capa del suelo que es explorada por las raíces de las plantas, posteriormente se realiza el retiro de los cilindros y las muestras se preparan y se colocan en un horno durante 24 h a 105 °C, para determinar su masa. El volumen se determina utilizando los valores de diámetro y la altura de la muestra de suelo [31]. La importancia de la determinación de la densidad aparente radica en que brinda información con respecto a la compactación y permite inferir posibles dificultades de enraizamiento y circulación del agua y aire en el suelo [21].

2.5.2 Propiedades químicas del suelo

Las propiedades químicas del suelo representan las reacciones complejas y los diversos procesos que ocurren todo el tiempo en él. El suelo es considerado una entidad química debido a que, se encuentra compuesto por sólidos, líquidos, gases; solubles e insolubles; así como, sustancias orgánicas e inorgánicas [34]. Las propiedades químicas del suelo representan la disponibilidad de nutrientes o la deficiencia de estos, casi todas estas propiedades requieren análisis de campo o laboratorio, en donde algunas son utilizadas como referencia para conocer el estado actual de la calidad del suelo [35], en donde se

incluyen: conductividad eléctrica (CE), pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC), materia orgánica (MO) por mencionar algunos.

2.5.2.1 Conductividad eléctrica

La CE es un indicador de la calidad del suelo que representa la cantidad de sales que se encuentran presentes y la capacidad del suelo para conducir corriente eléctrica [36]. Esta medida se ve influenciada por el contenido de humedad [16], distribución de tamaño de partículas, MO, compactación del suelo y contenido de nutrientes [37].

Esta propiedad está directamente relacionada con el rendimiento de los cultivos, la disponibilidad de nutrientes que las plantas requieren, así como, con la actividad microbiana del suelo que son claves en los procesos del suelo, ya que el exceso de sales disueltas dificulta el crecimiento de las plantas al afectar el equilibrio suelo-agua. Aunque la CE no proporciona una medición específica de los iones presentes, esta se ha correlacionado con las concentraciones de cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ y NH_4^+) y aniones (SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- y HCO_3^-) los cuales llevan cargas eléctricas y conducen la corriente eléctrica [36].

2.5.2.2 pH

El pH del suelo es la medida de la concentración de iones H^+ en la disolución del suelo y manifiesta al grado de acidez o alcalinidad del mismo [38]. Frecuentemente, se determina en laboratorio utilizando suspensiones de suelo en soluciones de CaCl_2 0.1 M o KCl 1 M [35]. El pH es una de las propiedades más importantes involucradas en el crecimiento de las plantas [32] principalmente, por su influencia en otras propiedades del suelo, incluida la disponibilidad de nutrientes, toxicidad elemental y actividad microbiana [34].

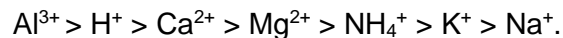
El pH del suelo depende de varios factores [38]:

- Relación suelo- agua.
- Presencia de sales solubles.
- CO_2 de la atmósfera edáfica.

Aunque los iones H^+ pueden ejercer efectos corrosivos en las membranas de la raíz de las plantas a un pH muy bajo, generalmente los efectos del pH del suelo en las plantas son indirectos, por ejemplo, en suelos ácidos, las plantas pueden sufrir deficiencia de Ca, Mg, P, Mo y al mismo tiempo estar expuestas a la toxicidad de Al, Fe y Mn [34]. Otras propiedades que pueden ser afectadas por el pH del suelo son algunas propiedades biológicas (valores extremos de pH disminuyen la actividad microbiana en los suelos), y propiedades físicas (en suelos ácidos se pueden presentar una baja permeabilidad o una pobre estabilidad estructural) [35].

2.5.2.3 Capacidad de Intercambio Catiónico

La CIC también es conocida como capacidad de intercambio de bases o capacidad de adsorción de bases [38], y es la cantidad de cationes intercambiables (cationes básicos: Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ y cationes ácidos: H^+ , Al^{3+}) que un suelo puede adsorber a un pH 7, bajo condiciones dadas de temperatura, presión, composición de la fase líquida y una relación de masa-solución [21]. De esta manera, la escala de afinidad para los cationes dominantes en los suelos se puede resumir de la siguiente manera [35]:



La suma de cationes intercambiables se denomina CIC y se expresaba en meq 100 g^{-1} de suelo seco, sin embargo, actualmente se expresa en Cmol 100 g^{-1} . La CIC se encuentra directamente relacionada con los contenidos y tipos de arcilla, así como, del contenido de materia orgánica, por lo que, a mayor cantidad de arcilla o materia orgánica mayor es el valor de la CIC [38], de igual manera se encuentra relacionada con la textura y pH del suelo; en suelos con textura arcillosa la CIC aumenta [34].

2.5.2.4 Materia orgánica

La MO es un indicador de la calidad del suelo [21] y se define como la suma de todos los materiales de origen vegetal o animal encontrados en el suelo o en su superficie, en donde se incluyen tejidos y células de organismos en diferentes estados de descomposición [38].

La MO es un factor clave que afecta la actividad biológica de los suelos; es la fuente de carbono para muchos organismos incluida la población microbiana del suelo [35]. El % MO en los primeros centímetros del suelo generalmente es alto y va disminuyendo a medida que aumenta la profundidad, lo que se define como una disminución de carbono orgánico regular [9]. Los factores que influyen en el contenido de MO son: vegetación, clima, organismos del suelo, textura, composición mineralógica de las arcillas y estructura, entre otras, de igual manera la MO influye sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y da lugar a múltiples interrelaciones como se muestra en la Tabla 3 [21].

Tabla 3. Contribución de la materia orgánica en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Adaptado de [21].

Propiedad	Contribución
Física	Estructuración, porosidad y aireación, movimiento del agua, capacidad de retención de agua y prevención de los procesos erosivos.
Química	Procesos de intercambio iónico, estabilización de nutrientes en forma orgánica (N , P y S) y formación de complejos organominerales.
Biológica	Formación del suelo, reserva de energía metabólica, por las grandes cantidades de carbono y nutrientes, fuente de macronutrientes (N , P, y S) y micronutrientes (B y Mo), estimulación e inhibición de la actividad enzimática, contiene reguladores del crecimiento de las plantas, efecto antibiótico frente a organismos patógenos y contribuye a la resiliencia de los ecosistemas.

La renovación de la MO desempeña un papel fundamental en el correcto funcionamiento del ecosistema del suelo, ya que la materia orgánica es imprescindible para la estabilización de la estructura del suelo y además al descomponerse libera los nutrientes necesarios para el desarrollo de las plantas [39].

2.5.3 Propiedades biológicas del suelo

La ciencia reciente ha avanzado en la investigación de los microorganismos en el suelo, anteriormente se consideraba que el suelo era un material inerte compuesto únicamente por sustancias químicas que favorecían el crecimiento de los cultivos, ahora se sabe que es el lugar en donde habitan miles de organismos vivos de cuya actividad depende la fertilidad del suelo [35,40]. Las comunidades microbianas del suelo juegan un papel fundamental en la interacción planta-microorganismo ya que transforman casi todos los bioelementos del suelo [41], y reciclan los nutrientes esenciales a través de procesos de mineralización y descomposición de la materia orgánica [35] inclusive transforman algunos elementos en forma gaseosa que se pueden perder en el suelo y otras transformaciones que predisponen la pérdida de nutrientes [41]. Así mismo, estos microorganismos influyen directamente en el ciclo biogeoquímico del suelo al alterar la disponibilidad de nutrientes a través de procesos de solubilización, quelación, y oxidación/reducción [42]. En el ambiente del suelo los organismos se desarrollan dentro y entre las partículas del suelo, en donde las diferentes variaciones de pH, humedad, tamaño de poro y disponibilidad de alimentos genera una amplia gama de hábitats [42], lo cual se muestra en la Figura 6, en donde se observa la distribución de los diferentes organismos que habitan generalmente en cada horizonte del suelo.

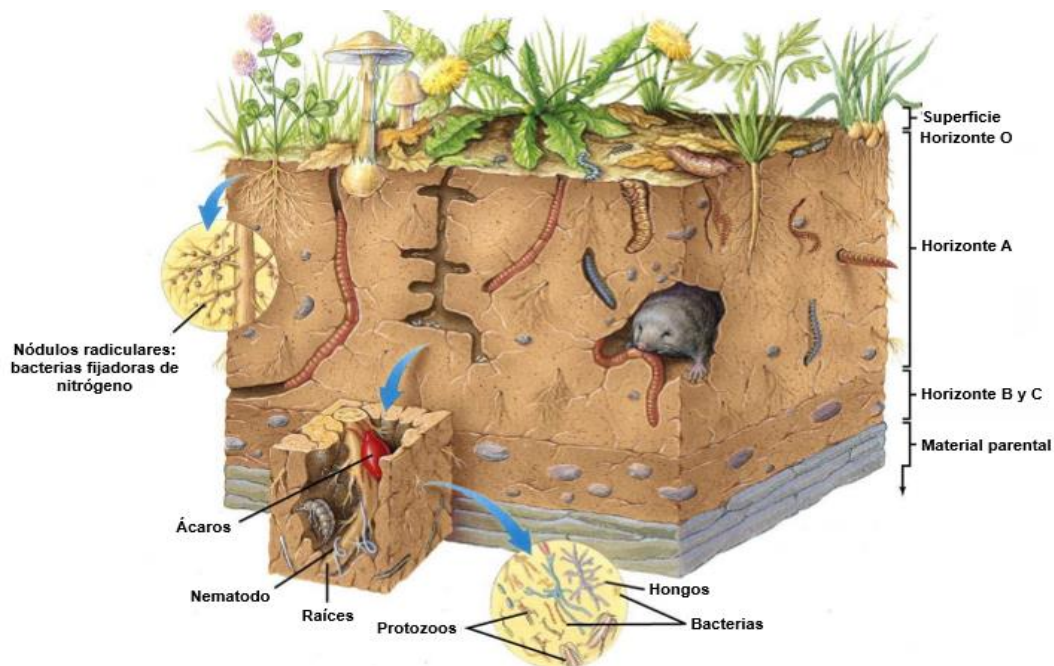


Figura 6. Organismos presentes en los diferentes horizontes del suelo (figura adaptada de [43]).

La biodiversidad del suelo se encuentra conformada por: bacterias, hongos, protozoos, insectos, mamíferos y otros invertebrados que, combinados con el carbono orgánico, generan la capacidad metabólica de los suelos, además se cree que estos desempeñan un papel importante en el aumento de la producción de alimentos. Las diferentes comunidades complejas de organismos en el suelo determinan la magnitud y dirección de los flujos de carbono entre la atmósfera y el suelo, influyen en el ciclo del carbono orgánico y en la disponibilidad de nutrientes, así como mejoran la estructura física y control biológico de plagas y polinización de cultivos [39]. La biodiversidad asegura el funcionamiento del ecosistema, y cada organismo, independiente de su tamaño, tienen una función importante que desempeñar. Los organismos del suelo frecuentemente se clasifican según su tamaño como se muestra en la Tabla 4 [39].

Tabla 4. Clasificación de los organismos del suelo según su tamaño [39].

Tamaño	Microfauna (1 – 100 μm)	Mesofauna (100 μm – 2 mm)	Megafauna (< 2 mm)
+ -	Protozoos	Colémbolos	Lombrices
	Nemátodos	Ácaros	Hormigas
	Hongos	Tardígrados	Cochinillas
	Bacterias	-	Termitas

Los microorganismos más importantes del suelo son los hongos, bacterias y actinomicetos (Figura 7) por las distintas funciones que cumplen en los procesos del suelo. Las bacterias y los hongos son el comienzo de la red alimenticia y apoyan a otros organismos que forman parte de la biodiversidad del suelo, además de controlar su funcionamiento y servir como indicadores de la salud y calidad del ecosistema [44].

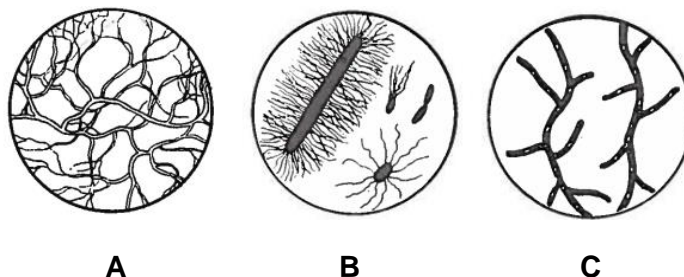


Figura 7. Microorganismos fundamentales del suelo: (A) hongos, (B) bacterias y (C) actinomicetos [18].

En un gramo de suelo pueden estar presentes 10^8 bacterias y en un centímetro cúbico de suelo tomado a 30 cm de profundidad se pueden encontrar de 1 a 2 millones de bacterias de diferentes especies, así como grandes cantidades de hongos. En las profundidades más bajas del suelo los números de bacterias y hongos disminuyen ya que pocos se encuentran a 1.30 m de profundidad [40].

2.5.3.1 Bacterias

Las bacterias son células procariotas (Figura 8B), por lo que carecen de organelos especializados como núcleo, cloroplastos, entre otros. Son organismos unicelulares, de tamaño pequeño; las más grandes superan los 4 - 5 μm de longitud y las más pequeñas se acercan al tamaño de una partícula de arcilla promedio (2 μm), pueden presentar formas variadas (redondas, ovaladas, forma de espiral o bastón), siendo las últimas las más predominantes [18].

Todas las células bacterianas se encuentran rodeadas por una red macromolecular tridimensional porosa, que generalmente se conoce como pared bacteriana o envoltura celular, la diferencia que existe en la estructura de las paredes celulares permite distinguir a las bacterias en Gram (+) o Gram (-) (Figura 8A). Un polímero fundamental de la pared celular es el peptidoglicano. Las paredes celulares de las bacterias Gram (+) contienen altas concentraciones de peptidoglicano, mientras que en el caso de las envolturas complejas de las células Gram (-) este peptidoglicano se encuentra restringido a una capa delgada entre el citoplasma y la membrana externa [45]. La mayoría de estas macromoléculas son polielectrolitos, porque llevan grupos cargados como: grupos carboxílicos ($-\text{COO}^-$), fosfatos ($-\text{PO}_4^{-2}$) o aminos ($-\text{NH}_3^+$). La presencia de grupos aniónicos y catiónicos confieren a la pared bacteriana propiedades anfóteras, lo que implica que dependiendo del pH, la carga neta en la pared puede ser positiva, negativa o cero [45,46].

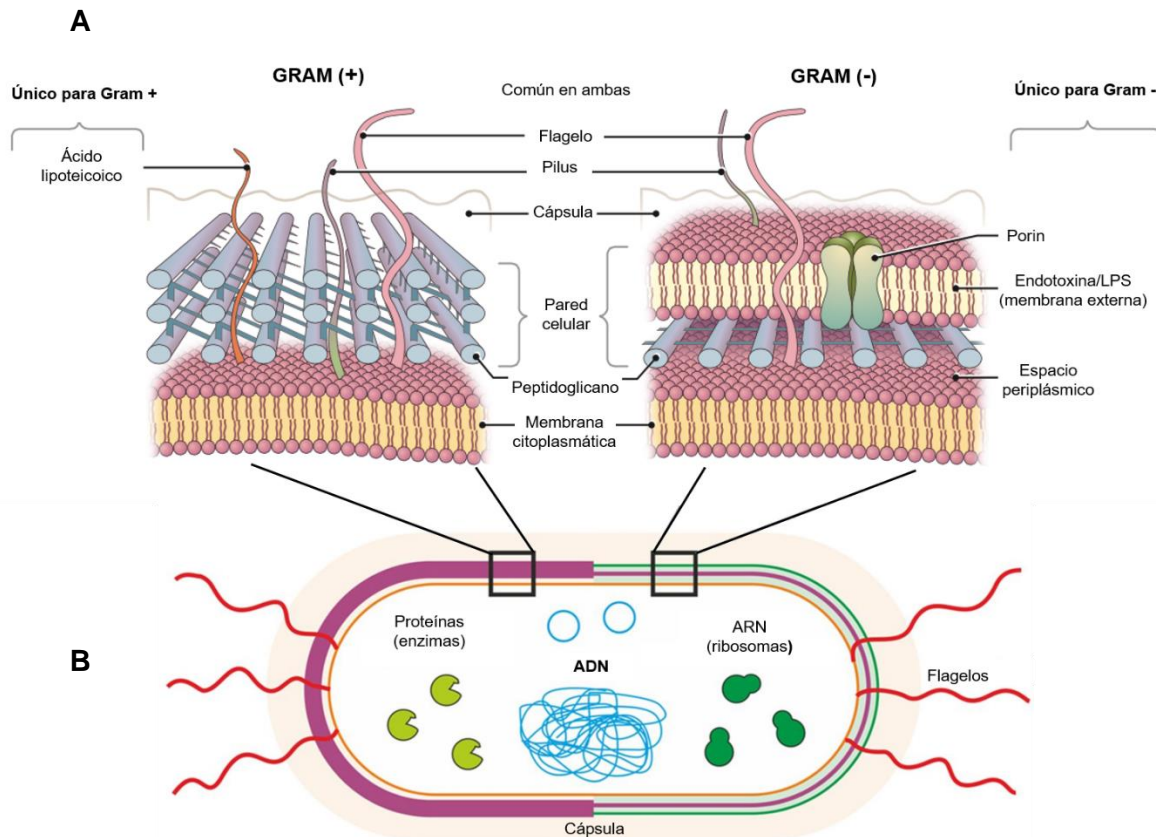


Figura 8. Estructura bacteriana (B) Gram (+) y Gram (-) con su respectiva pared celular (A) (figuras adaptadas de [47]).

En el suelo la mayor población se encuentra en los horizontes superficiales debido a las condiciones de humedad, aireación y nutrientes. Las bacterias, participan en tres transformaciones enzimáticas básicas: oxidación de nitrógeno, oxidación de azufre y fijación de nitrógeno. Diversas condiciones del suelo afectan el crecimiento de las bacterias. Entre los más importantes se encuentran el suministro de oxígeno, humedad, temperatura, cantidad y naturaleza de la materia orgánica, pH (6 - 8) y cantidad de calcio intercambiable (altas concentraciones son favorables para el crecimiento de las bacterias) [18].

La mayoría de las especies bacterianas en el suelo son heterotróficas u organotróficas que necesitan la materia orgánica para alimento o energía. Las bacterias heterotróficas se pueden dividir en bacterias fijadoras o no fijadoras de N_2 [48]. Un gran número de bacterias de los géneros *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Enterobacter* y *Klebsiella* son eficientes fijadoras de nitrógeno. Así mismo, algunas bacterias producen de manera natural hormonas que estimulan el crecimiento de las plantas, ejemplo de esto, son las bacterias del género

Bacillus, *Pseudomonas* y *Azospirillum*. En especial, la especie *Azospirillum* estimula el crecimiento de las raíces y promueve la germinación mientras que las *Pseudomonas* suprimen patógenos, estas últimas pueden ser encontradas en todo tipo de suelo agrícola [49].

De manera general, se puede mencionar que los géneros de bacterias más importantes en la agricultura por las diversas transformaciones de compuestos orgánicos e inorgánicos que desarrollan para favorecer la nutrición y crecimiento de las plantas son: *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Beijerinckia*, *Nitrosomas*, *Nitrobacter*, *Clostridium*, *Thiobacillus* y *Rhizobium* [49].

2.5.3.2 Hongos

Los hongos son organismos eucariotas (Figura 9A), no contienen clorofila, se reproducen por medio de esporas [50] y son heterotróficos. La mayoría consiste en filamentos microscópicos llamados hifas (la red de hifas se conoce como micelio) (Figura 9B) las cuales están asociadas con múltiples funciones dependiendo de la especie fúngica como: absorción de nutrientes de un huésped o del suelo y transporte de nutrientes. Los hongos obtienen las sustancias orgánicas que necesitan para su crecimiento a través de diferentes formas: saprofitismo (los hongos de este tipo juegan un papel importante en la descomposición de la materia orgánica), parasitismo y simbiosis mutualista [51].

Prácticamente, todos los compuestos orgánicos pueden ser degradados por una o más especies de hongos debido a la producción de diversas enzimas como: amilasas, lipasas y proteasas que les permiten usar sustratos como almidones, grasas y proteínas [51]. Los hongos son organismos únicos debido a sus características morfológicas, fisiológicas y genéticas; son capaces de colonizar diferentes matrices (suelo, agua y aire), sin embargo, el hábitat principal de estos organismos es el suelo (del 1 % al 5 % de la MO corresponde a la biomasa microbiana del suelo, de los cuales alrededor del 90 % son hongos [41]). En términos de biodiversidad, los hongos son probablemente el segundo grupo más común en nuestro planeta, existe un aproximado de 1.5 millones de especies, solo por debajo de los artrópodos [51].

Estos microorganismos excretan ácidos orgánicos de bajo peso molecular como el ácido cítrico, fumárico, málico y oxálico, lo cual genera un entorno favorable para su crecimiento, así como para la movilidad de nutrientes procedentes de los minerales y su posterior disposición para otros microorganismos como las bacterias [52]. En la Figura 9A se muestra la estructura de las hifas y los organelos que la conforman, así como la representación esquemática de la fisiología del micelio, de las hifas y de la pared celular (Figura 9B).

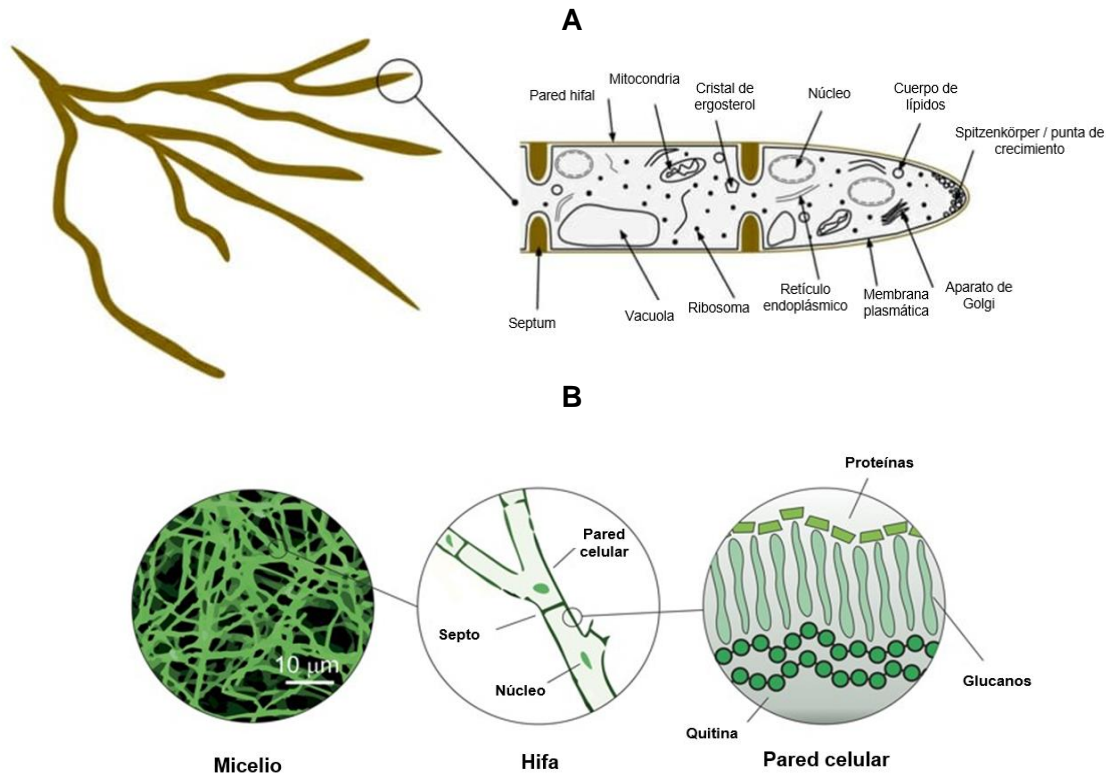


Figura 9. Estructura de una hifa y los organelos que la conforman (A) así como, la fisiología del micelio, y la representación de una hifa, la cual está formada por células separadas por paredes cruzadas (septo) todas encerradas dentro de una pared celular (B) (figuras adaptadas de [53]).

Los hongos son conocidos por ser posibles causantes de enfermedades en las diferentes actividades agrícolas, sin embargo, los hongos patógenos solo representan una pequeña cantidad del total de la comunidad de hongos del suelo. Por lo tanto, la mayoría de los hongos son benéficos para la salud y desarrollo de las plantas, como los géneros *Penicillium*, *Aspergillus*, *Trichoderma*, *Gliocladium*, *Mucor* y *Mortierella* [49]. Así mismo, algunos de los géneros de hongos más importantes asociados a las raíces de las plantas

son *Aspergillus*, *Penicillium*, *Rhizopus* y *Trichoderma*. Por su parte, el *Aspergillus* y *Penicillium* movilizan el fósforo y nitrógeno del suelo, mientras que el *Trichoderma* mantiene la humedad en las raíces en condiciones de sequía [49].

Es así como la comunidad microbiana del suelo está influenciada por una red interconectada de variables que difieren entre los ecosistemas, lo que genera que cada ecosistema sea único en su comunidad, además estas pueden estar inactivas en cualquier momento en la mayoría de los suelos, listas para responder a medida que las condiciones ambientales se vuelvan favorables para su crecimiento. De esta manera, ciertas bacterias y hongos generalmente se congregan en el suelo inmediatamente adyacente a las raíces de las plantas (la rizosfera), donde estos pueden alimentarse de los compuestos exudados por parte de las raíces de las plantas. De ahí que los estudios sobre el carbono y las comunidades microbianas a menudo se concentran en los primeros 20 - 30 cm de profundidad, debido a que, se considera que es la porción más activa biológicamente en el perfil de suelo. Las cantidades de hongos y bacterias disminuyen con la profundidad, y en los suelos más profundos es frecuente que se encuentren bacterias, particularmente los tipos Gram (+) de crecimiento lento [44].

2.5.3.3 Enzimas del suelo

Una mayor cantidad de microorganismos en el suelo asegura una mejor actividad metabólica y enzimática lo que genera plantas con una nutrición adecuada y buena capacidad de producirse. De esta manera, la microbiota y las enzimas del suelo están relacionadas y son un indicador importante de la calidad del suelo, con una expresión directa de las comunidades microbiológicas y sus requerimientos metabólicos y nutrientes disponibles [54]. Las enzimas del suelo son fundamentales para los procesos del ecosistema, ya que se encargan de catalizar innumerables reacciones en el suelo, y proporcionan información sobre el ciclo biogeoquímico del carbono y otros nutrientes [55].

Las enzimas del suelo son producidas principalmente por raíces de plantas y animales del suelo, así como por microorganismos que juegan un papel fundamental en el ciclo de nutrientes, y que reflejan la actividad microbiana del suelo y la fertilidad del mismo. Por lo que, para mantener los procesos en el suelo es fundamental un sistema equilibrado de enzimas. La ausencia o inhibición de las actividades enzimáticas del suelo provoca una

disminución de los procesos y da como resultado una mala nutrición en las plantas. Las enzimas pueden existir internamente o en las membranas superficiales de células vivas (intracelulares), excretarse en la solución del suelo o ser liberadas durante el metabolismo y muerte celular (extracelulares) [55].

Las enzimas extracelulares liberadas en el suelo son “permanentemente” inmovilizadas en arcillas y coloides húmicos por medio de interacciones iónicas, enlaces covalentes, atrapamiento y otros mecanismos [56], este tipo de enzimas ayudan a la descomposición de la MO y a la mineralización del carbono orgánico, así como del P y N del suelo. Una cantidad considerable de enzimas se une a las partículas del suelo o a la biomasa microbiana y no es extraíble, por lo que queda fuera de la estimación. La actividad enzimática en los suelos cambia con las variaciones de humedad y temperatura. Los contenidos de MO, nitrógeno y diversos micronutrientes regulan la producción de enzimas en el suelo [57]. Es así como comprender las diferentes funciones de las enzimas del suelo puede ayudar en el manejo de la salud, calidad y fertilidad de los suelos, particularmente en ecosistemas agrícolas.

Las enzimas deshidrogenasas (enzimas intracelulares) del suelo son uno de los componentes principales de las actividades enzimáticas del suelo que participan y aseguran el correcto funcionamiento de las rutas bioquímicas en los ciclos biogeoquímicos del suelo [58]. La deshidrogenasa tiene un papel importante en la oxidación de la materia orgánica mediante la transferencia de hidrógeno desde sustratos orgánicos hasta aceptores inorgánicos [59]. Por lo anterior, la actividad deshidrogenasa se utiliza frecuentemente como medida ante alguna interrupción causada por pesticidas, oligoelementos o prácticas de manejo en el suelo, así como una medida directa de la actividad microbiana, ya que esta refleja la capacidad metabólica del suelo y su actividad se considera proporcional a la biomasa de los microorganismos del suelo [58].

2.6 Crecimiento de plantas

Una de las funciones más importantes del suelo es proporcionar apoyo a las plantas [32]. Las plantas son organismos que se caracterizan por ser autótrofos, fotosintéticos y tener células eucariotas como se muestra en la Figura 10. Los tejidos vegetales están formados por células eucariotas de tipo vegetal que se encuentran rodeadas por una capa extracelular denominada pared celular dentro de la cual se encuentra el protoplasto, cuyo límite externo es la membrana plasmática que contiene una variedad de organelos unidos a la membrana, compartiendo funciones especializadas [60].

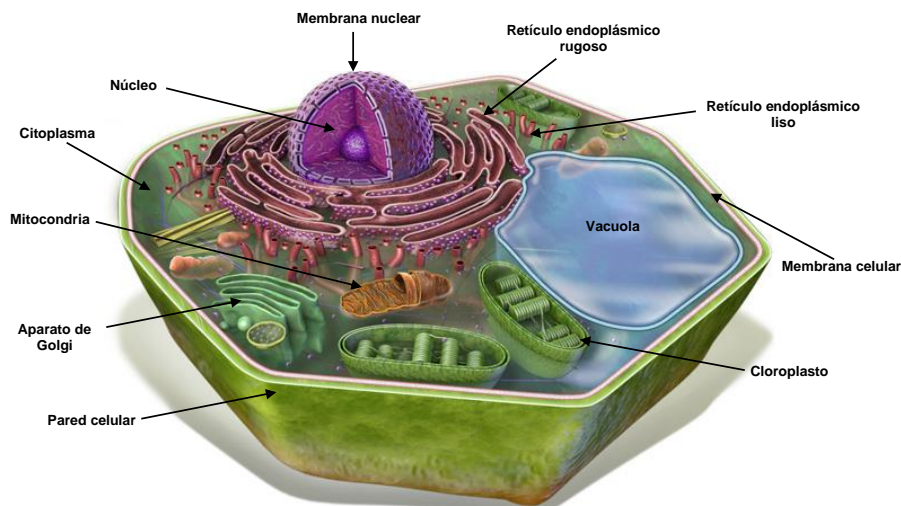


Figura 10. Representación esquemática de una célula vegetal (figura adaptada de [61]).

Las plantas juegan un papel importante en la formación del suelo, influyen en la acumulación de la materia orgánica, mezcla de perfiles, meteorización biogeoquímica, ciclo de nutrientes y la estabilización de los agregados, además influyen en los procesos físicos y químicos del suelo e interactúan con una gran variedad de organismos [62]. Para su crecimiento las plantas requieren obtener nutrientes. Existen 15 nutrientes que las plantas necesitan en diferentes cantidades, pero de igual importancia para su desarrollo. Las plantas extraen carbono, oxígeno, e hidrógeno esencial del aire y agua lo que constituye la mayor parte de su peso. Del suelo obtienen los tres macronutrientes más esenciales N, P, y K, los cuales son necesarios en mayores cantidades comparados con el resto; nutrientes secundarios en cantidades menores; y micronutrientes en pequeñas cantidades porque también son esenciales [40,62,63] como se muestra en la Figura 11.

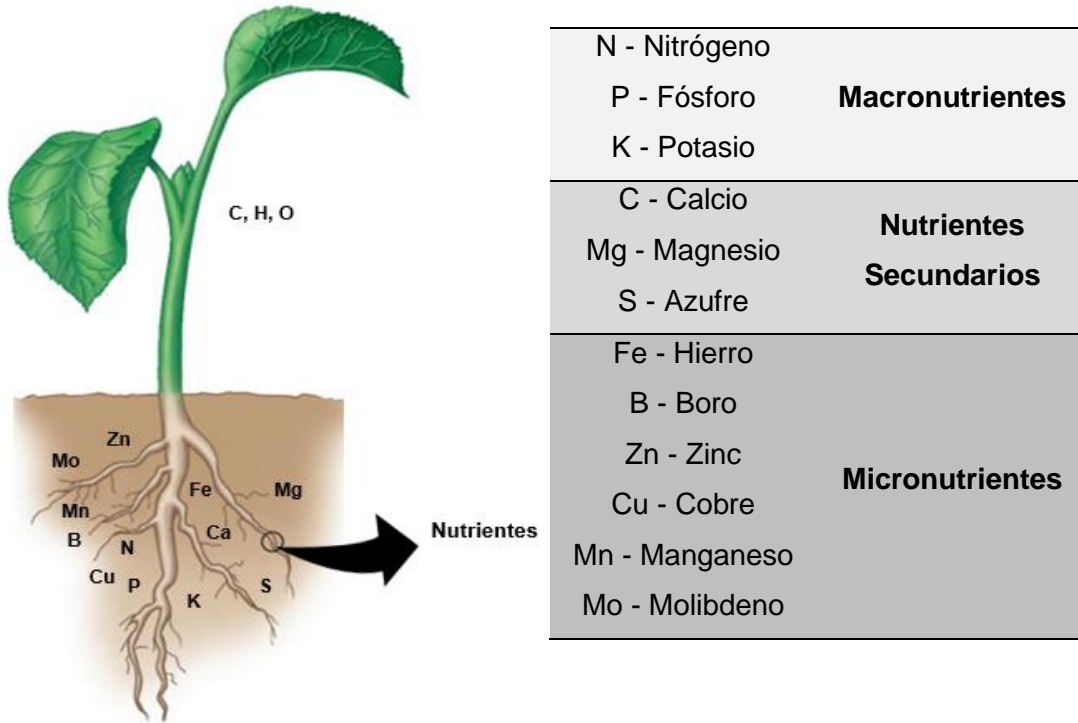


Figura 11. Representación de los nutrientes esenciales para las plantas (figura adaptada de [62]).

En 1939 Arnon y Stout establecieron los siguientes tres criterios que deben cumplirse para que un elemento sea considerado esencial en el desarrollo de las plantas [63]:

1. La planta debe ser incapaz de completar su ciclo de vida debido a la ausencia de este mineral.
2. La función del elemento no debe ser remplazado por otro elemento mineral.
3. El elemento debe estar directamente involucrado en el metabolismo de la planta.

Es así como en la Tabla 5 se muestran las concentraciones necesarias de los elementos esenciales para mantener un crecimiento óptimo y prevenir síntomas de deficiencia en las plantas, así como la forma en que los nutrientes son absorbidos por las plantas y su concentración promedio en materia seca.

Tabla 5. Forma común de los elementos esenciales absorbidos por las raíces de las plantas y su contenido en materia seca para un adecuado crecimiento (información adaptada de [32,63]).

Nutriente	Forma común absorbida por las plantas	Concentración en tejido seco (ppm)
Macronutrientes		
Nitrógeno	NO_3^- , NH_4^+	15,000
Fósforo	H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}	2,000
Potasio	K^+	10,000
Calcio	Ca^{2+}	5,000
Magnesio	Mg^{2+}	2,000
Azufre	SO_4^{2-}	1,000
Micronutrientes		
Manganeso	Mn^{2+}	50
Hierro	Fe^{2+} , Fe^{3+}	100
Boro	H_3BO_3	20
Zinc	Zn^{2+}	20
Cobre	Cu^{2+}	6
Molibdeno	MoO_4^{2-}	0.1
Cloro	Cl^-	100

Los minerales inorgánicos presentes en el suelo se usan para la nutrición de las plantas. Estos elementos están formados por la interacción compleja en donde se involucra la meteorización de la roca madre y la descomposición de la materia orgánica debido a los animales macro y microscópicos presentes [63]. Las raíces absorben los nutrientes esenciales en forma de sales disueltas en la solución del suelo como se mostró en la Tabla 5, posteriormente, de que son absorbidos son trasladados a varias partes de las plantas, en donde desempeñan funciones biológicas indispensables para el crecimiento y desarrollo de las mismas. Las partículas del suelo pueden tener carga negativa por los iones libres y grupos funcionales presentes en la materia orgánica; esto último debido a la descomposición microbiana de plantas, animales y microorganismos que forman la materia orgánica del suelo; durante esta descomposición la disociación de los iones hidrógeno del ácido carboxílico y de los grupos fenólicos del suelo proporcionan cargas superficiales negativas [63] como se muestra en la Figura 12.

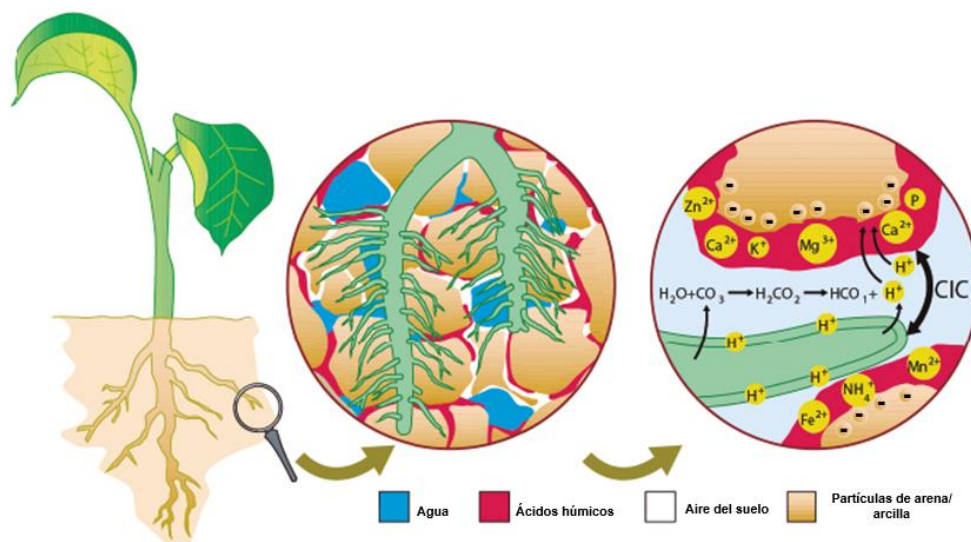


Figura 12. Absorción de nutrientes del suelo por las plantas (figura adaptada de [64]).

Esta carga superficial de las partículas del suelo tienen un papel importante durante la nutrición de la plantas, ya que cationes minerales como NH_4^+ y K^+ se adhieren a la materia orgánica o compuestos inorgánicos cargados negativamente, factor importante que impide que estos cationes se puedan perder por lixiviación [35,63].

Las raíces constituyen órganos vegetales fundamentales para la absorción de agua y nutrientes [65]. Los compuestos orgánicos exudados por las raíces de las plantas (incluidos los aniones orgánicos de bajo peso molecular) influyen en las propiedades químicas del suelo y aumentan la actividad biológica del suelo. La rizosfera es un espacio de intensa interacción entre las raíces de las plantas y los microorganismos del suelo [35].

Las raíces de las plantas secretan diferentes compuestos inorgánicos y orgánicos que estimulan el crecimiento de los microorganismos en el suelo, a su vez, los microorganismos secretan compuestos químicos que liberan los minerales de los materiales orgánicos en el suelo, que más tarde son adsorbidos por las raíces de las plantas [65], sin embargo, también pueden afectar el desarrollo de las plantas a través de la producción de reguladores de crecimiento [35].

Los nutrientes en el suelo están presentes en distintas formas químicas, pueden estar en la solución en los poros del suelo o encontrarse adheridas a las partículas del suelo. Debido a que el suelo no es un “sistema cerrado” se producen ganancias o pérdidas de nutrientes

hacia la atmósfera o por lixiviación [35]. El flujo de nutrientes a las raíces de las plantas proviene de la solución entre los poros del suelo, principalmente como iones disueltos. Las interacciones químicas (adsorción / desorción o precipitación / solubilización) y biológicas (inmovilización / mineralización) afectan las tasas de intercambio y equilibrio de nutrientes en el suelo [35].

En el suelo, en algunos casos, las concentraciones de nutrientes, pueden estar en grandes cantidades que no son necesarias para el crecimiento de las plantas e inclusive suelen ser potencialmente dañinos para las mismas. Por lo que, los mecanismos por los cuales las plantas acumulan nutrientes deben ser selectivos. La absorción de iones por parte de plantas inferiores y superiores se caracterizan por [63]:

1. **Selectividad:** algunos elementos minerales pueden ser absorbidos mientras otros son discriminados e inclusive excluidos.
2. **Acumulación:** la concentración de elementos puede ser mayor en la vacuola (savia celular) que en la solución externa.
3. **Genotipo:** existen diferencias marcadas entre diferentes especies de plantas en sus características de absorción de iones.

El movimiento de iones, ácidos orgánicos, aminoácidos y azúcares desde la solución externa a través de las paredes celulares radiculares individuales es un proceso no metabólico, impulsado principalmente por difusión o flujo másico. Sin embargo, estos compuestos pueden interactuar con las paredes celulares que pueden facilitarlos o restringirlos, e inclusive captarlos a través de la membrana plasmática de las células individuales [63].

La bicapa lipídica de la membrana plasmática evita el movimiento indiscriminado de iones y moléculas polares grandes desde el apoplasta (afluencia) y desde el citoplasma hacia el apoplasta (flujo de salida), lo que indica que la membrana plasmática actúa como una barrera selectiva para la absorción de iones. Además, el pH de la solución entre los poros del suelo influye directamente en la absorción de nutrientes por parte de las raíces de las plantas, sus efectos se pueden agrupar en tres categorías: la primera en donde se incluyen

los efectos del pH de la solución entre los poros del suelo en las especies químicas que se encuentran presentes, segunda, los efectos del pH apoplasmático en las concentraciones de iones presentes en el apoplasto, y por último los efectos del pH presente en la rizosfera en el gradiente electroquímico de protones y la fuerza impulsora para su transporte [63].

De manera general se puede mencionar que el pH de la solución entre los poros del suelo influye en la disponibilidad de cationes y aniones para su absorción por parte de la raíz, mientras que el pH de la rizosfera afecta la absorción de iones al alterar la concentración de iones (H^+) y la fuerza motriz electroquímica para el transporte de protones. La absorción de agua también puede afectar la absorción de iones ya sea directamente al influir en la velocidad del transporte radial de iones a través del apoplasto, e indirectamente al influir en el suministro de iones a la membrana plasmática de las células de la raíz [63].

En algunos casos la pared celular contiene poros, llamados espacios interfibrilares e intermicelares los cuales difieren en su tamaño, por lo que se han calculado los diámetros máximos de los poros de las paredes celulares de las plantas y estos se encuentran regularmente en el rango de 5.0 nm, sin embargo, si estos se comparan con los diámetros de algunos iones hidratados como K^+ (0.66 nm) y Ca^{2+} (0.82 nm) son más pequeños, por lo tanto no se esperaría que los poros de la pared celular generaran algún tipo de restricción de estos iones a través de la pared celular [66].

Por el contrario, el movimiento de quelatos metálicos, ácidos fúlvicos, toxinas e inclusive virus y demás agentes patógenos se vería restringido a través de las paredes celulares por el diámetro de poro que estos presentan. En las raíces, los cationes de la solución externa pueden acumularse en el espacio libre, mientras que los aniones son repelidos [66].

De igual manera las especies de plantas varían considerablemente en su CIC, se conoce que la CIC de las especies dicotiledóneas (semillas que presentan dos cotiledones) es mayor que la de las especies monocotiledóneas (semilla que presenta un cotiledón). Por lo tanto, la CIC de la raíz puede afectar la velocidad de la selectividad y movilidad de los iones [66].

2.7 Sistema de producción sostenible de cultivos

El sistema convencional de agricultura puede conducir a la degradación del ambiente, generar problemas económicos y conflictos sociales [67]. Los avances tecnológicos más importantes aplicados a la actividad agrícola han sido el control de plagas, suministro específico de nutrientes al suelo y la introducción de nuevas especies genéticamente modificadas [68].

Sin embargo, se han planteado dudas sobre la sustentabilidad de los procesos agrícolas, ya que se tiene una alta dependencia de los fertilizantes químicos, pesticidas y herbicidas, en este sentido se han propuesto alternativas como la agricultura orgánica, agroecología, agricultura sostenible y tecnologías limpias aplicadas a la agricultura [68]. Sin duda, en este nuevo siglo, la agricultura convencional avanza poco a poco hacia una agricultura sostenible, con el objetivo de mantener el equilibrio ecológico en las zonas agrícolas [68].

En este sentido, la producción sostenible de cultivos se refiere a la producción agrícola de tal manera que no se cause ningún daño al medio ambiente, la biodiversidad y la calidad de los cultivos agrícolas. Con la producción sostenible de cultivos se mantiene el suelo vivo con adecuados contenidos de materia orgánica, manejo integral de plagas, reducción del uso de pesticidas, protección a la biodiversidad, además se garantiza la calidad de los cultivos, calidad de nutrientes y fertilidad del suelo [67], por lo que este tipo de producción no solo satisface las necesidades de alimentos, sino que además mejora la calidad del ambiente y de los recursos naturales, un ejemplo de esta tecnología es la denominada técnica de electrocultivo, con la cual se ha demostrado que se mejoran las propiedades del suelo, así como se favorecen los procesos de germinación y crecimiento de diferentes tipos de plantas [8,69,70].

2.8 Electrocultivo

La técnica de electrocultivo consiste en la aplicación de un campo eléctrico, ya sea con corriente directa o alterna, directamente en el suelo con la finalidad de estimular las semillas o plantas tanto en su velocidad de germinación como en su desarrollo [69,71]. Durante la aplicación de esta técnica ocurren diversos fenómenos de transporte al aplicar un campo eléctrico, los cuales se esquematizan en la Figura 13 y se describen a continuación [5,72–74].

Electromigración: fenómeno por el cual los iones en la solución del suelo y los coloides que presentan carga eléctrica se mueven al electrodo de carga opuesta a una velocidad proporcional a la intensidad del campo eléctrico aplicado y la movilidad del ion o partícula.

Electroósmosis: fenómeno por el cual, el líquido saturante junto con las sustancias suspendidas en él (microorganismos, coloides con o sin carga) fluyen hacia uno de los electrodos, generalmente del ánodo al cátodo.

Electroforesis: ocurre cuando hay partículas o coloides con carga eléctrica, de forma que los iones ligados a estos materiales se transportan por efecto del campo eléctrico.

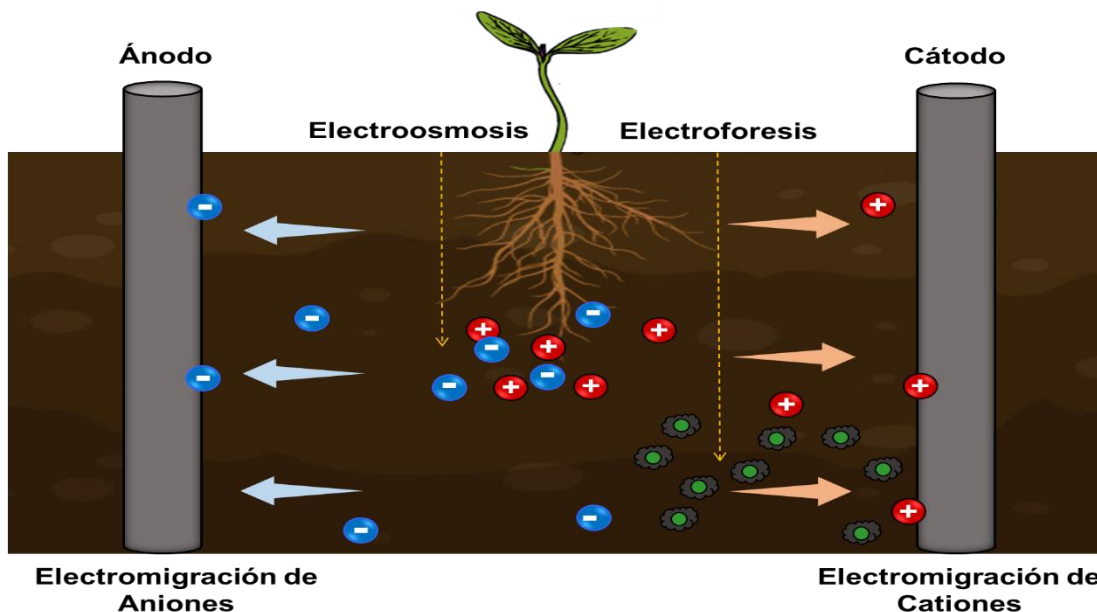


Figura 13. Representación esquemática de los fenómenos ocurridos durante la aplicación de la técnica de electrocultivo (figura adaptada de [73]).

Los principales factores que influyen en este tipo de técnica son: pH, contenido de agua y conductividad eléctrica. De esta manera, los elicitores son agentes que inducen respuestas de defensa en las plantas, generalmente, se clasifican en bióticos o abióticos. Los inductores de estrés biótico tienen origen biológico y pueden derivarse de patógenos o de la misma planta (por ejemplo, ácido salicílico). Por su parte, los inductores de estrés abiótico no tienen origen biológico, algunos ejemplos de ellos son: radiación UV, temperatura, CO₂, macro y micronutrientes, metales pesados y heridas. Los provocadores de estrés abiótico antes mencionados se encuentran bien investigados, sin embargo, las investigaciones con respecto a los efectos de la electricidad en las respuestas de las plantas aún se encuentran limitadas, por lo que, no está claro si se puede clasificar como inductor de estrés abiótico para afectar plantas [6].

Por lo tanto, las aplicaciones de electricidad en las plantas mediante el electrocultivo se han realizado directamente en semillas para disminuir el tiempo de germinación en donde se ha mejorado hasta un 150 % [75], así como durante el crecimiento de la plantas [8,69,70] o en frutos [76] según el caso.

El efecto del tratamiento eléctrico sobre las semillas se manifiesta por su respuesta al estímulo externo, que provoca un efecto inductivo, es decir, que el efecto persiste incluso después de haber eliminado el estímulo. Por lo tanto, la semilla tiene que recibir el contenido de energía necesaria para inducir el mecanismo de reacción. De igual manera, se ha comprobado que el tratamiento de semillas aplicando un campo eléctrico aumenta significativamente la germinación comparada con el control. El contenido de energía transmitido a la semilla dependerá por lo tanto, de la fuerza del campo eléctrico y de las propiedades eléctricas de la misma semilla [77].

La aplicación directa de una corriente eléctrica suave y constante puede generar un crecimiento más rápido y una madurez más temprana de la planta tratada [78]. De esta manera, un horticultor ruso describió que todas las células vegetales son campos eléctricos especiales; la electricidad débil pasa insensatamente por toda la planta. Por lo tanto, ejercer un campo eléctrico en las plantas resulta beneficioso por lo siguiente [79]:

1. Promueve el metabolismo y aumenta la fotosíntesis.
2. Controla la cantidad de entrada y salida de Ca^{2+} en la planta.
3. Aumenta la velocidad de absorción de CO_2 ; y proporciona material para la fotosíntesis.

Así mismo, la estimulación eléctrica podría desencadenar actividades biológicas de las plantas, mejorando su tasa de producción. Los tratamientos eléctricos con intensidades relativamente bajas, aplicados durante un tiempo de exposición corto, han tenido un impacto positivo en las tasas de crecimiento, rendimientos, longitud y tamaño en varias plantas [71]. Por otra parte, también se han aplicado campos eléctricos pulsados de alta intensidad para la protección de alimentos y control microbiano, una intensidad de pulso eléctrico muy alta ($2.0 - 5.0 \text{ V } \mu\text{m}^{-1}$ o 16.7 kV cm^{-1}) inactiva por completo los microorganismos Gram (+), Gram (-) y eucariotas en condiciones de baja temperatura [80].

Con respecto a la aplicación de campos eléctricos pulsados de baja intensidad Seo *et al.*, aplico un campo eléctrico pulsado de (0.3 V cm^{-1}) en el suelo en donde obtuvo que estas bajas intensidades no destruyen ni las células bacterianas ni las células vegetales, sin embargo, el número de células disminuye significativamente después de la aplicación del campo eléctrico pulsado, pero la germinación de las plantas no se ve afectada. Es posible que 0.3 V cm^{-1} no sea un factor para dañar las células bacterianas, pero puede inducir fluctuaciones en los ambientes de hábitats bacterianos ya que un entorno en continuo cambio puede inducir a las bacterias a consumir mayor energía que en un entorno estable [81].

La existencia de carga eléctrica externa podría inducir un potencial de acción que ocasionaría cambios transitorios a corto plazo en el ciclo de vida de la planta, como la absorción de agua, la respiración, la fotosíntesis y su crecimiento [80]. Los potenciales de acción no mostrarán respuesta si el estímulo eléctrico se encuentra por debajo del umbral, en cambio podrá exhibir una respuesta máxima si el estímulo se encuentra entre ciertos mínimos y máximos del umbral [71].

Las cargas eléctricas también ocasionan el flujo significativo de iones de calcio (Ca^{2+}), el cual es un regulador fundamental del crecimiento y desarrollo de las plantas [71] debido a que la electro-estimulación de plantas puede inducir la activación de canales iónicos y el transporte de iones, activación de sistemas enzimáticos, así como influir en el crecimiento de las plantas [82].

Por lo tanto, el uso de energía eléctrica para organismos biológicos tiene potencial de aumentar la producción de alimentos [83], sin embargo, se ha demostrado que las respuestas de las plantas a los estímulos externos dependen de la amplitud, frecuencia e intensidad a las que sean expuestas [71] así como de la dirección del campo eléctrico aplicado, debido a que en estudios se ha obtenido que la dirección del campo eléctrico también puede influir en el crecimiento de las plantas, por ejemplo, se ha indicado que en brotes de frijol expuestos a dirección de campo eléctrico vertical presentan mayores crecimientos comparados con los de la dirección de campo eléctrico horizontal [83].

2.8.1 Electroodos

Para la aplicación de un campo eléctrico se requiere del empleo de electrodos. Un electrodo es un conductor eléctrico encargado de transportar electrones [84]. Los estudios electroquímicos se basan en las estructuras y procesos entre un electrodo y un conductor iónico (electrolito) o en la interfase entre dos electrolitos, entendiéndose por interfase aquella región de las dos fases adyacentes cuyas propiedades difieren del resto. La modificación de la superficie del electrodo por diferentes técnicas o materiales pueden producir estructuras muy complejas, sin embargo, dichos electrodos modificados tienen aplicaciones importantes como la protección contra la corrosión, el desarrollo de sensores y la electrocatálisis [85,86]. Así mismo, la modificación de un electrodo se realiza con el objetivo de aumentar el control cinético y termodinámico a nivel interfacial, lo que se refleja en una mayor selectividad, resistencia mecánica y transferencia electrónica, lo que incrementa sus propiedades electrocatalíticas [87].

De manera particular los electrodos utilizados durante el tratamiento electroquímico de suelos pueden ser electrodos desnudos o modificados, en este sentido se han evaluado diversos materiales de electrodos, en especial del material anódico para favorecer un pH ácido y por lo tanto una mayor solubilidad de nutrientes y consecuente disponibilidad para

su sorción a través de las raíces hacia las demás partes de la planta. Sin embargo, la mayoría de los electrodos reportados que se emplean para aplicar un campo eléctrico en el suelo presentan desventajas significativas, como una rápida pérdida de actividad (electrodo de grafito), liberación de iones tóxicos (PbO_2), alto costo (diamante dopado con boro) y vida útil limitada (SnO_2). Sin embargo, dentro de estos últimos electrodos tipo DSA[®], se ha propuesto su incremento en vida útil al incorporar los óxidos de metales de transición como los IrO_2 y RuO_2 en presencia de Ta_2O_5 , lo cual además de mejorar su estabilidad mecánica y actividad electrocatalítica [88], evita la liberación de iones tóxicos hacia el suelo [4].

Es así como los electrodos tipo DSA[®] modificados con óxidos de metales de transición ($\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5|\text{Ti}$ y $\text{RuO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5|\text{Ti}$) también han sido utilizados durante el desarrollo de la técnica de electrocultivo, con los cuales se han obtenido resultados favorables en cuanto al incremento en la germinación y desarrollo de plantas [70,73,84] en comparación con el desarrollo de esta técnica utilizando electrodos desnudos de Ti o grafito [73].

2.8.2 Configuración de electrodos

Por otra parte, durante el tratamiento electroquímico de suelos, se han reportado distintas configuraciones de electrodos en serie o en paralelo, o utilizando arreglos rectangulares o circulares; los principales utilizados son los tipos de arreglo 1D (conformado únicamente por un ánodo y un cátodo) y 2D (más de un par de electrodos), donde la disposición de un solo cátodo rodeado por ánodos es la más común [89], como se muestra en la Figura 14.

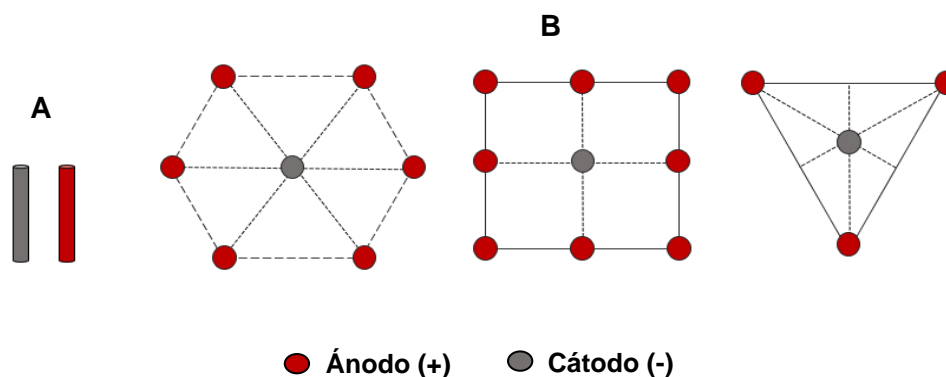


Figura 14. Ejemplo de arreglo 1D (A) y arreglo 2D hexagonal, cuadrado y triangular (B) (figuras adaptadas de [89]).

De manera particular durante el desarrollo de la técnica de electrocultivo se han utilizado arreglos de electrodos 1D y 2D a nivel laboratorio, así como diferentes materiales de electrodos (grafito, titanio y electrodos modificados con óxidos de metales de transición) para la estimulación eléctrica de distintas variedades de plantas de interés comercial y ambiental como: *Lolium perenne* [69], *Arabidopsis thaliana*, *Mammillaria mathildae* [7], *Triticum aestivum*, *Echinocactus grusonii* [73] *Zea maíz L* [84] y *Cucumis sativus* [70].

2.9 Pepino (*Cucumis sativus*)

El pepino pertenece a la familia de las cucurbitáceas cuyo nombre científico es *Cucumis sativus* ., que comprende 90 géneros y 750 especies; es una especie de planta termofílica y susceptible a las heladas, desarrollándose mejor en temperaturas superiores a 20 °C [90], sobre los 40 °C el crecimiento de las plantas cesa y a temperaturas menores a 1 °C las plantas mueren [91]; su taxonomía se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Taxonomía del pepino [91].

Nombre científico	Subdivisión	Clase	Orden	Familia	Género	Especie
<i>Cucumis sativus</i> .	Angiosperma.	Dicotiledóneas	Cucurbitales	Cucurbitácea	Cucumis	<i>Sativus L</i>

El pepino puede ser cultivado en una amplia gama de suelos fértiles y drenados, incluyendo arenosos y franco-arcillosos, sin embargo, los suelos ideales para su desarrollo son los suelos francos que poseen alto contenido de materia orgánica (más del 3.5 %); su período de germinación se encuentra entre los 8 y 12 días [70]. El cultivo del pepino es moderadamente tolerante a la acidez y salinidad [92], puede adaptarse en suelos con rangos de pH de 5.5 a 6.8; soportando incluso pH de 7.5 ; los suelos que deben evitarse son aquellos con pH inferiores a 5.5. A continuación, se mencionan algunas de las características generales de las plantas de pepino.

Semilla: Es ovalada de color blanca amarillenta, protegida por una cubierta dura, tiene un tamaño de 8 a 10 mm de longitud y de 3 a 5 mm de espesor [91].

Tallo: Es una guía de zarcillos (ayudan a la planta a sujetarse al suelo) de porte rastrero y trepador [93] con un eje principal que da origen a varias ramas laterales. Los tallos pueden alcanzar hasta 3.5 m de longitud en condiciones favorables [91].

Raíz: Presenta un sistema radicular muy potente [93] que consiste en una raíz principal que puede alcanzar de 1.0 a 1.2 m de largo con ramificaciones en los primeros 30 cm del suelo [91].

Hojas: Son pecioladas, alternas pero opuestas a los zarcillos, son ásperas, presentan epidermis con cutícula delgada que minimiza la transpiración excesiva [91].

Flor: Contiene flores de ambos sexos en la misma planta, por lo que, es considerada monoica de polinización cruzada [91], sus flores aparecen en las axilas de las hojas [93].

Fruto: Se considera una baya falsa, alargada y cilíndrica, comúnmente, con dimensiones entre 15 y 35 cm de longitud; es un fruto color blanco en su interior y el exterior es de color verde oscuro o claro [91].

Es así como el cultivo de pepino es corto y depende principalmente de las condiciones edafoclimáticas y del manejo que este reciba durante su desarrollo. La primera etapa (germinación) ocurre entre los días 5 a 10 después de la siembra. La segunda etapa (desarrollo vegetativo) es bastante acelerado durante casi todo el ciclo del cultivo, disminuyendo su ritmo únicamente en los estados finales cuando la planta inicia el proceso de senescencia. La tercera etapa (floración) ocurre entre los 24 y 37 días y por último, la etapa de madurez ocurre entre los 40 y 70 días [94]; en la Figura 15 se observan las etapas de crecimiento de pepino mencionadas anteriormente.

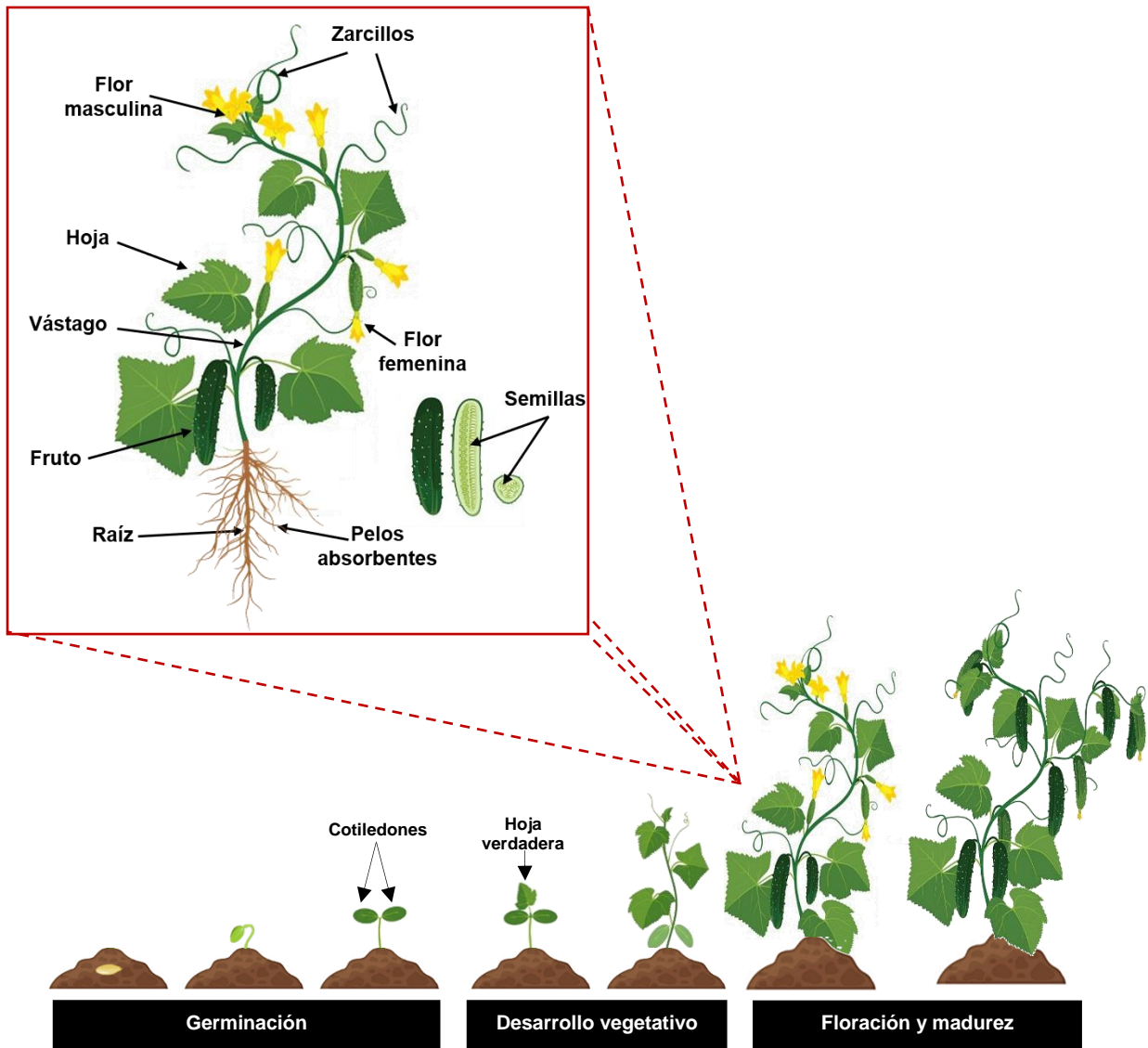


Figura 15. Etapas de crecimiento del pepino (figura adaptada de [70]).

El pepino requiere una gran cantidad de nutrientes, pero es muy sensible al exceso o variaciones en las concentraciones de estos en el suelo. El periodo de mayor demanda coincide con el inicio de la formación de los frutos. El fósforo tiene un papel fundamental en las etapas de enraizamiento y floración, por lo que, es determinante para la adecuada formación de raíces y flores. El calcio influye directamente en la calidad y favorece a una mayor defensa frente a enfermedades. Por su parte, los microelementos (principalmente, el hierro y manganeso) inciden en el color de la fruta, calidad y resistencia [93]. Este cultivo demanda altas concentraciones de fósforo, potasio y nitrógeno (fundamental en la composición de diversas biomoléculas), por lo que, es importante cuidar el balance de nutrientes para evitar posibles antagonismos, ya que algunos desórdenes nutricionales

podrían ser perjudiciales para su correcto desarrollo. En la Tabla 7 se muestran algunos efectos de estas deficiencias en las plantas de pepino.

Tabla 7. Deficiencias nutricionales en las plantas de pepino (tabla adaptada de [91]).

Nutriente	Efecto
Nitrógeno	Retrasa el crecimiento, los frutos toman un color amarillo pálido.
Fósforo	Retrasa el crecimiento dejando las hojas pequeñas y rígidas.
Potasio	Detención de crecimiento y acortamiento de los entrenudos, a medida que avanza la deficiencia, la clorosis entre nervaduras es más pronunciada.
Magnesio	Color amarillento en los bordes de las hojas más viejas, y disminución del vigor y actividad fotosintética.
Calcio	Puntos blancos transparentes en las hojas jóvenes cerca de los bordes y nervaduras.
Azufre	El crecimiento disminuye, dejando las hojas pequeñas, colgantes y de color verde pálido o amarillo.
Hierro	Las hojas jóvenes presentan color amarillo entre las nervaduras, y los frutos se tornan pálidos.
Manganeso	Genera el desarrollo moteado intervenal de las hojas más jóvenes, y después se tornan de color amarillo blanquecino desde los bordes hacia el centro.
Boro	Se produce un rajado del tallo, las hojas más viejas y medias se vuelven cloróticas y aparecen manchas acuosas y en ocasiones mueren frutos jóvenes.

El cultivo de hortalizas en México está creciendo a un ritmo sostenido, la tendencia de crecimiento seguirá aumentado, ya que uno de los principales factores es que cada vez se encuentra mejor posicionado en el mercado norteamericano. El 98 % de la producción bajo cubierta (invernaderos) en México se destina a la horticultura, siendo únicamente 3 cultivos los que ocupan la mayoría de la superficie, tomate (70 %), pimiento (16 %), pepino (10 %) y otros (4 %), como se muestra en la Figura 16 [95].

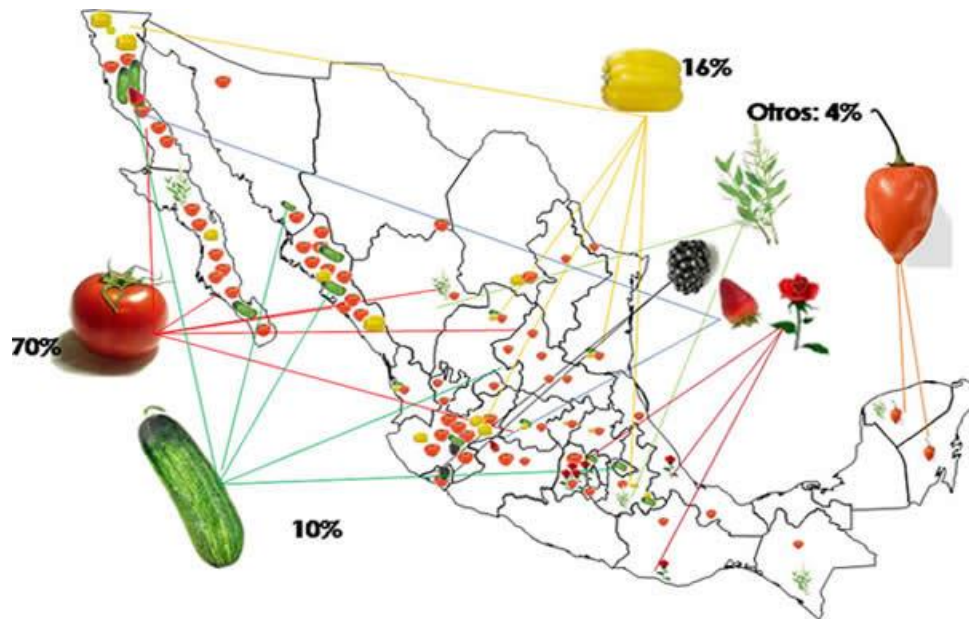


Figura 16. Distribución de las principales hortalizas producidas bajo cubierta en México. [95].

En este sentido, en México de acuerdo con el SIAP, la producción de pepino en 2019 fue de 803 mil 706 toneladas, de las cuales, casi el 60 % de la producción se concentró en tres entidades federativas principalmente: Sinaloa (33.1 %), Sonora (18.3 %) y Michoacán (7.8 %) [96] como se observa en la Figura 17.

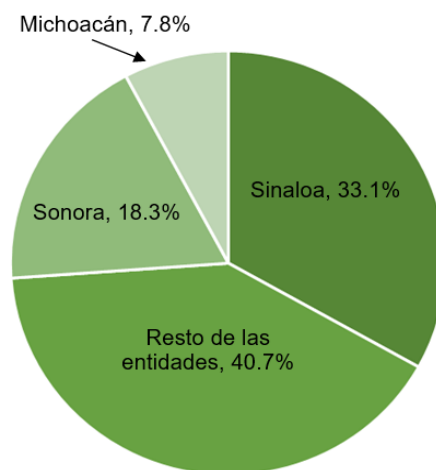


Figura 17. Principales entidades productoras de pepino en 2019 [96].

Además, la mayor disponibilidad de este cultivo es entre los meses de enero a mayo (Figura 18). De las entidades en México que cosechan pepino, seis de ellas tienen las condiciones para la cosecha a lo largo del año [96]. A nivel mundial, México es el sexto productor; de la producción nacional el 72.3 % tiene por destino principalmente Estados Unidos [96].

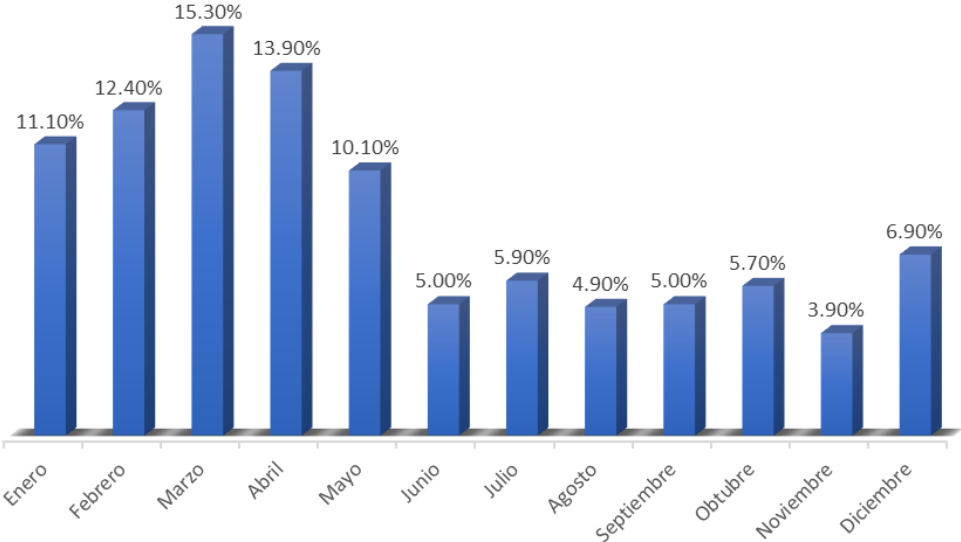
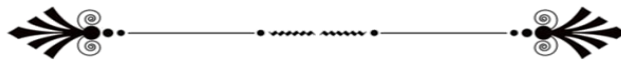


Figura 18. Representación gráfica de la estacionalidad de la producción de pepino en México (figura adaptada de [96]).

ANTECEDENTES



El primer trabajo sobre la aplicación de electricidad en relación con objetos biológicos fue realizado por Maimbray en 1746 en la ciudad de Edimburgo en donde observó la estimulación eléctrica en el crecimiento y floración de plantas de mirto [78,97].

Sin embargo, el primer investigador en realizar experimentos a gran escala fue Karl Lemström en 1985 en donde expuso una gran variedad de cultivos a intensidades de campo eléctrico aproximadamente de 10 kV m^{-1} , con estos estudios observó la estimulación en el crecimiento (hasta del 70 %) de cultivos como papas, zanahorias y apio, además, notó que las plantas sometidas al campo eléctrico eran más verdes y resistentes, aunque esta técnica no siempre funciona, en promedio generalmente, existía una estimulación en el rendimiento cercana al 45 %. Los resultados presentados por Lemström generaron una gran actividad de los científicos agrícolas con la finalidad de explotar los efectos positivos obtenidos, denominando así a esta técnica como electrocultivo [98,99].

En años recientes se ha investigado la influencia del campo eléctrico de corriente alterna y directa en el crecimiento de plantas [7,8,100–102], utilizando diferentes intensidades de campo eléctrico [83,102] y tipos de electrodos. A pesar de las diferentes investigaciones, el efecto que la aplicación de la electricidad podría causar en las respuestas de las plantas son aún limitadas. No está claro si los campos eléctricos podrían considerarse inductores de estrés abiótico a las plantas [6].

Por lo que, en el grupo de investigación a cargo de la Dra. Erika Bustos Bustos en CIDETEQ se ha desarrollado investigación referente a la técnica de electrocultivo, lo que ha permitido su registro de patente MX/a/2017/014948, esta técnica se ha empleado para la estimulación de distintas plantas con metabolismo C3 (*Arabidopsis thaliana* y *Triticum aestivum* (trigo)), C4 (*Zea mays* (maíz) y *Lolium perenne*) y CAM (*Mammillaria mathildae* y *Echinocactus grusonii*) debido a que son plantas de interés científico y ambiental, además de que algunas de ellas se encuentran amenazadas o en peligro de extinción.

En estos estudios, se ha evaluó el efecto de la aplicación de un campo eléctrico de 0.1, 0.2, 0.4, y 0.8 V cm^{-1} utilizando corriente directa, corriente alterna, y corriente directa con intercambio de polaridad, utilizando diferentes arreglos de electrodos (1D y 2D), así como diferentes materiales de electrodos tanto a nivel laboratorio como a nivel piloto; de los cuales se obtuvieron resultados favorables dado que, las plantas respondieron

efectivamente a la aplicación de un campo eléctrico entre 0.1 y 0.2 V cm^{-1} utilizando $\text{Ti} | \text{Ti}$ o $\text{IrO}_2\text{Ta}_2\text{O}_5 | \text{Ti}$ tanto en arreglo de electrodos 1D y 2D donde el electrocultivo mostró ser más eficiente incrementado la tasa de germinación, desarrollo de las plantas y cantidad de biomasa total obtenida, tanto a nivel laboratorio como a nivel piloto; así mismo, se concluyó que el arreglo de electrodos 1D y 2D no mostró diferencias, por lo que, se consideró que este únicamente debe ser un factor dependiendo del sitio en donde se aplicará esta tecnología [73].

Posteriormente, los estudios se centraron en el desarrollo del electrocultivo en específico de *Zea mays L* (maíz), utilizando electrodos cilíndricos modificados de $\text{RuO}_2\text{-TaO}_5 | \text{Ti}$ o $\text{IrO}_2\text{-TaO}_5 | \text{Ti}$ como ánodo y un electrodo cilíndrico de Ti aplicando un campo eléctrico de 0.2 V cm^{-1} durante 4 h para la etapa de germinación, y posterior aplicación de un campo eléctrico de 0.2 V cm^{-1} durante 3 h con ciclos de 12 h por dos semanas para la etapa de crecimiento; de igual manera se realizó una caracterización del suelo antes y después de la aplicación del campo eléctrico para determinar el efecto de este en las propiedades fisicoquímicas.

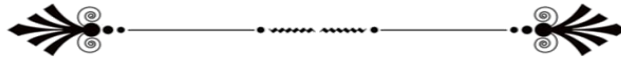
De estos estudios se obtuvieron resultados favorables, ya que al aplicar el campo eléctrico con las superficies modificadas se incrementó el porcentaje de germinación de las semillas: 100 % empleando $\text{RuO}_2\text{-TaO}_5 | \text{Ti}$ y 94 % empleando $\text{IrO}_2\text{-TaO}_5 | \text{Ti}$ con respecto al control con el que se obtuvo 83 % de germinación, lo cual se atribuyó a una mayor movilidad de los nutrientes en el suelo debido a la imposición del campo eléctrico; así mismo, en las demás propiedades fisiológicas de las plantas determinadas como: longitud de tallo, raíz, hoja, vástago, peso seco de raíz, y peso seco de vástago se obtuvieron resultados favorables en las plantas que fueron tratadas con los electrodos modificados de $\text{RuO}_2\text{-TaO}_5 | \text{Ti}$, seguidas de las que fueron tratadas con $\text{IrO}_2\text{-TaO}_5 | \text{Ti}$ con respecto al control [84].

Posteriormente, en la caracterización edafológica antes y después de la aplicación del campo eléctrico se presentó un incremento en la CIC en el suelo del electrocultivo con respecto al control, en el caso de la materia orgánica, se registró un incremento en las diferentes zonas de la celda del electrocultivo en donde se utilizaron los electrodos de $\text{IrO}_2\text{-TaO}_5 | \text{Ti}$, en cambio en donde se utilizaron los electrodos de $\text{RuO}_2\text{-TaO}_5 | \text{Ti}$ se observó un incremento en la región de media celda, seguida de la región del cátodo.

Por otra parte, el contenido de cloruros (Cl^-), registró un aumento en la concentración en las celdas en donde se empleó el electrocultivo comparado con el suelo control; así mismo, las concentraciones de sodio (Na^+) incrementaron en las celdas de electrocultivo, en específico en las zonas cercanas al ánodo, y las concentraciones de fósforo (PO_4^{2-}) aumentaron en las celdas sobre todo en la región cercana al cátodo [84].

Recientemente, continuando con esta línea de investigación, se desarrolló el electrocultivo de pepino (*Cucumis sativus*) para favorecer su tasa de germinación y crecimiento aplicando un campo eléctrico de 0.2 V cm^{-1} durante 4 h utilizando electrodos modificados de $\text{IrO}_2\text{-TaO}_5/\text{Ti}$ como ánodos y Ti como cátodo en un arreglo 1D de electrodos; de estos estudios se obtuvo que aplicando un campo eléctrico con las superficies modificadas de $\text{IrO}_2\text{-TaO}_5/\text{Ti}$ la germinación y crecimiento de las plantas de pepino mostraron un menor tiempo de emergencia con un incremento en la altura, grosor de la planta, longitud de los cotiledones, ancho y largo de las hojas verdaderas comparado con el control [70].

JUSTIFICACIÓN

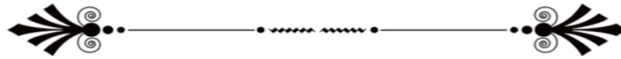


Los suelos son indispensables para la vida en la tierra, sin embargo, debido a las presiones humanas sobre este recurso, actualmente está llegando a límites críticos generando la pérdida de los suelos productivos lo que directamente podría ocasionar un incremento en los precios de los alimentos y potencialmente causar pobreza en millones de personas [103]. De igual manera, existen suelos que han sido modificados como resultado directo de las actividades humanas [104] denominados Antrosoles, los cuales están limitados en profundidad por roca dura continua en los primeros 25 cm, o contienen algún material con más del 40 % de carbonato de calcio [105]. Por lo que, en años recientes se han implementado algunas estrategias que incrementan los insumos agrícolas, sin embargo, generan mayores implicaciones como emisiones globales de gases de efecto invernadero, y una limitada disponibilidad de agua. Debido a esto, existe la necesidad de generar alternativas para incrementar el abastecimiento de alimentos y salvaguardar los servicios de los ecosistemas [103].

Existen diferentes técnicas para mantener la fertilidad del suelo como son: la rotación de los cultivos, adición de fertilizantes o de enmiendas. Otra técnica que ha sido empleada y que ha demostrado que mejora las propiedades fisicoquímicas del suelo, la actividad microbiana y las tasas de germinación y crecimiento de plantas es la denominada técnica de electrocultivo [5,7].

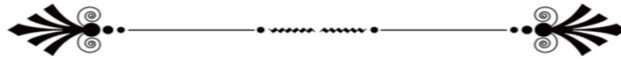
Por lo tanto, la finalidad de esta investigación fue proponer una alternativa mediante la técnica de electrocultivo utilizando electrodos modificados con óxidos de metales de transición tanto a nivel laboratorio en un Vertisol pélico como a nivel piloto en un Antrosol, en los cuales se estimularon las semillas de pepino aplicando un campo eléctrico, beneficiando los porcentajes de germinación y crecimiento de las plantas, así como la actividad microbiana y las propiedades fisicoquímicas del suelo empleado. En esta investigación se utilizó la planta de pepino como planta de estudio debido a su rápida germinación [70], contenido nutricional e importancia comercial [96] y por permitir ser cultivada en una amplia gama de suelos fértiles y drenados, incluyendo arenosos y franco-arcillosos, siendo los suelos ideales para su desarrollo los suelos francos que poseen abundante contenido de materia orgánica [70].

HIPÓTESIS



Aplicando un campo eléctrico en un Antrosol empleando un arreglo 2D de electrodos de Ti modificados electroforéticamente con $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$ se podría estimular eléctricamente las semillas de *Cucumis sativus* para incrementar su tasa de germinación y crecimiento debido a la electromigración de micro y macronutrientes, así como la electroforesis de bacterias y hongos.

OBJETIVOS



6.1 Objetivo General

Estimular eléctricamente la germinación de semillas y crecimiento de plantas de *Cucumis sativus* en un Antrosol empleando un arreglo 2D de electrodos de Ti modificados electroforéticamente con $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$ para favorecer la electromigración de micro y macronutrientes, así como la electroforesis de bacterias y hongos.

6.2 Objetivos específicos

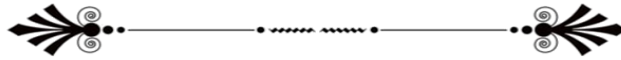
6.2.1 Germinar las semillas y crecer las plantas de *Cucumis sativus* en un Vertisol pélico (referencia) y Antrosol empleando un arreglo 2D de electrodos con las superficies modificadas de $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5|\text{Ti}$ aplicando un campo eléctrico.

6.2.2 Caracterizar edafológicamente antes y después de aplicar el electrocultivo en un Vertisol pélico (referencia) y Antrosol empleando un arreglo 2D de electrodos con las superficies de $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5|\text{Ti}$.

6.2.3 Evaluar las características bacterianas y fúngicas en un Vertisol pélico (referencia) y Antrosol antes y después del electrocultivo empleando un arreglo 2D de electrodos con las superficies modificadas de $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5|\text{Ti}$.

Estas páginas fueron eliminadas debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública 2017, y con el Artículo 116 de la Ley General de Transparencia y Acceso a la Información Pública 2015.

PRODUCTOS CIENTÍFICOS



10.1 Artículo Indizado.

10.1.1 ***“Electrical Stimulation of Cucumis sativus using IrO₂-Ta₂O₅/Ti Anodes in Vertisol pelic Soil”***. C. Morales, S. Solís, F. J. Bacame, M. Y. Reyes, J. Manríquez and E. Bustos. *Applied Soil Ecology*, 2020 (sometido).

10.2 Presentación en Congresos.

10.2.1 ***“Influencia del Tipo de Arreglo de Electrodo para la Germinación y Crecimiento de Plántulas de Cucumis sativus en un Suelo Tipo Vertisol pélico a Nivel Laboratorio empleando Electrodo Modificados.”*** C. Morales, A. Luviano, J. Elías y E. Bustos. Conferencias Temáticas del Día Mundial del Suelo. El Centro de Geociencias de la UNAM y el Centro Educativo y Cultural del Estado de Querétaro. Santiago de Querétaro, Qro., 5 de diciembre de 2019 (Poster).

10.2.2 ***“Evaluación del Efecto en las Propiedades Edafológicas de un Suelo Tipo Vertisol pélico antes y después del Electrocultivo de Cucumis sativus empleando Electrodo Modificados con Óxidos de Metales de Transición en un Arreglo de Electrodo 2D a Nivel Laboratorio.”*** J. I. Elías, A. D. Luviano, C. Morales, S. Solís, J. Manríquez y E. Bustos. Conferencias Temáticas del Día Mundial del Suelo. El Centro de Geociencias de la UNAM y el Centro Educativo y Cultural del Estado de Querétaro. Santiago de Querétaro, Qro., 5 de diciembre de 2019 (Poster).

10.2.3 ***“Comparación Morfológica del Electrocultivo de Cucumis sativus utilizando Peat moss como Sustrato en un Arreglo 1D.”*** A. D. Luviano, J. I. Elías, C. Morales y E. Bustos. Conferencias Temáticas del Día Mundial del Suelo. El Centro de Geociencias de la UNAM y el Centro Educativo y Cultural del Estado de Querétaro. Santiago de Querétaro, Qro., 5 de diciembre de 2019 (Poster).

10.2.4 ***“Comparación de las Características Edafológicas antes y después del Electrocultivo de Cucumis sativus”***. César Morales, Saray Olibama Monterrubio, Javier Ángeles, Sara Solís Valdés y Erika Bustos Bustos. 44º Congreso Mexicano de la Ciencia del Suelo: El Suelo en donde Todo Comienza. Aguascalientes, Aguascalientes, del 28 al 31 de octubre de 2019 (Poster).

10.2.5 ***“Comparison of the Edaphologic Characteristics Before and After the Electrofarming of Cucumis sativus”***. César Morales, Saray Olibama Cruz Monterrubio, Javier Ángeles Rodríguez, Sara Solís Valdéz and Erika Bustos Bustos. 17th International Symposium of Electrokinetic Remediation. Del 22 al 27 de septiembre de 2019, San Miguel de Allende, Guanajuato, México (Poster).

10.3 **Apoyo en la Formación de Recursos Humanos.**

10.3.1 **Tesis de Licenciatura.**

10.3.2 ***“Evaluación Edafológica Antes y Después del Electrocultivo de Cucumis sativus empleando Electroodos Modificados a Nivel Piloto”***. Tesis de la Carrera de Ingeniería en Biotecnología por parte de Jessica Itzell Elías Flores de la Universidad Politécnica de Guanajuato, Cortázar. 18 de septiembre al 20 de diciembre de 2019.

10.3.3 ***“Evaluación Microbiológica Antes y Después del Electrocultivo de Cucumis sativus empleando Electroodos Modificados a Nivel Piloto”***. Tesis de la Carrera de Ingeniería en Tecnología Ambiental por parte de Alma Delia Luviano Gutiérrez de la Universidad Politécnica del Estado de Guerrero. 16 de septiembre al 20 de diciembre de 2019.

10.3.4 ***“Seguimiento del Crecimiento de Hongos Durante el Electrocultivo de Cucumis Sativus Empleando Electroodos Modificados”***. Tesis de la Carrera de Ingeniería Química por parte de la C. Elsa Gabriela Cerón Gómez procedente de la Universidad Tecnológica de Tula Tepeji. 6 de mayo de 2019.

10.3.5 ***“Seguimiento del Crecimiento de Bacterias Durante el Electrocultivo de Cucumis Sativus Empleando Electroodos Modificados”***. Tesis de la Carrera de Ingeniería Química por parte de la C. Karla Karina Hernández Pérez procedente de la Universidad Tecnológica de Tula Tepeji. 6 de mayo de 2019.

10.4 **Técnicos Superiores Universitarios.**

10.4.1 ***“Evaluación de hongos y edafológica antes y después de electrocultivo de Cucumis sativus empleando electrodos modificados”***. Javier Ángeles Rodríguez. Técnico Superior Universitario en Química, Área Industrial de la Universidad Tecnológica de Tula Tepeji, del 6 de mayo al 16 de agosto 2019.

10.4.2 ***“Evaluación de bacterias y edafológica antes y después de electrocultivo de Cucumis sativus empleando electrodos modificados”***. Saray Olibama Cruz Monterrubio. Técnico Superior Universitario en Química, Área Industrial de la Universidad Tecnológica de Tula Tepeji, del 6 de mayo al 16 de agosto 2019.

10.5 **Premios.**

10.5.1 ***Primer lugar en la presentación del poster denominado “Comparison of the Edaphologic Characteristics Before and After the Electrofarming of Cucumis sativus”***. César Morales, Saray Olibama Cruz Monterrubio, Javier Ángeles Rodríguez, Sara Solís Valdéz and Erika Bustos Bustos. 17th International Symposium of Electrokinetic Remediation. Del 22 al 27 de septiembre de 2019, San Miguel de Allende, Guanajuato, México.