



c i d e t e q

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

DESARROLLO DE SUPERFICIES MODIFICADAS DE IrO₂-
Ta₂O₅ | Ti Y Ru O₂-Ta₂O₅ | Ti POR ELECTROFORESIS PARA
LA GERMINACIÓN DE SEMILLAS Y CRECIMIENTO DE
PLANTAS DE *Zea mays L.*

Tesis

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

Maestro en Ciencia y Tecnología

en la Especialidad de Ingeniería Ambiental

PRESENTA

I.Q. Jazmín Acuña Cháirez



Santiago de Querétaro, Qro., México, febrero de 2019.



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
Subdirector de Educación Continua y Posgrado
PICYT-CIDETEQ Querétaro.
P r e s e n t e.

Los abajo firmantes, miembros del jurado de Examen de Grado del Alumna: JAZMIN ACUÑA CHÁIREZ una vez leída y revisada la Tesis: “**DESARROLLO DE SUPERFICIES MODIFICADAS DE $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$ | Ti Y $\text{RuO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$ | Ti POR ELECTROFORESIS PARA LA GERMINACIÓN DE SEMILLAS Y CRECIMIENTO DE PLANTAS DE *Zea mays* L**”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentado por la alumna para aspirar al grado de Maestra 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 día 15 del mes de febrero del año dos mil diecinueve.

Dra. Irma Robles Gutiérrez
Presidente

M. en C. Sara Solís Valdéz
Secretario

M. en C. Jesús Cárdenas Mijangos
Vocal

Dedicatorias

Dedico éste trabajo con todo mi cariño a mi familia.

A mis padres:

Elisa Cháirez y Aurelio Acuña por su apoyo, amor y sacrificio en cada momento de mi vida, a ustedes que me han alentado a seguir y luchar por mis objetivos, sin dejarme olvidar de dónde vengo y que ante todo primero está la familia. Gracias a ustedes es que he logrado llegar aquí y convertirme en la persona que soy ahora, este logro es por y para ustedes.

Es un gran privilegio el ser su hija, los amo.

A mis hermanos:

Enrique, Aurelio, Elizabeth y Escarleth por siempre cuidarme y protegerme, porque cada uno me ha dado un gran ejemplo a seguir, por enseñarme a que con trabajo y dedicación es como se logran las cosas, por demostrarme que cuando caigo, tengo que levantarme y aprender de mis errores, y que sí flaqueo en mi objetivo, siempre contaré con sus manos firmes para ayudarme a lograrlo.

A mis sobrinos:

Leonardo, Fernando e Isabel, a ustedes el mejor regalo que pude recibir de mis hermanos, y por quiénes me esforzaré para lograr ser un gran ejemplo.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (**CONACYT**) por la beca otorgada durante la realización de mis estudios de maestría.

Al Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S. C. (**CIDETEQ**) por abrirme las puertas y permitirme seguir formarme como profesionista.

A mi asesora, la **Dra. Erika Bustos Bustos** por su confianza, por su guía y por brindarme las herramientas necesarias para la elaboración de este trabajo.

A mi comité tutorial por su contribución y seguimiento en el desarrollo de este trabajo, en especial al **Dr. Juan Manríquez Rocha** por permitirme trabajar en su laboratorio.

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

Al personal administrativo y de servicios de CIDETEQ, especialmente a la **Lic. Abigail de Jesús Pérez** y a la **TSU Claudia Nava** de la Subdirección de Posgrado.

A mis compañeros de laboratorio **Rosy, Gustavo, Ruslán, Alberto e Itzel** por su apoyo y enseñanza, y por hacer las horas de laboratorio más amenas.

A los estudiantes de estadías cortas: **Edith, Moisés y Jorge** por su colaboración y apoyo en la complementación de éste trabajo

A mis amigos: **Sonia, Alejandra, Emmanuel, Carlos, Juan Pablo y Ricardo**, gracias por acompañarme en esta etapa, por esas horas de plática, de juegos, de risas, por tantas horas de distracción, por brindarme su amistad y estar conmigo en uno de los momentos más difíciles que me tocó vivir.

A las personas que conocí durante este tiempo, a **Montse, Martha, Marisela, José Luis, Alex, Julio, Janet, Oscar, Erick**, y a todos aquellos que con sólo un saludo y una sonrisa enriquecían mis días.

A mi novio **Mario Hernández** por ser la primera persona en alentarme a tomar la decisión de ingresar a la maestría, por apoyarme una vez que logré entrar, porque nunca has dejado de creer en mí, incluso cuando yo misma he dejado de hacerlo, por tu amor, tu enseñanza y tu apoyo a lo largo de éstos años, por estar en los momentos importantes de mi vida, pero sobre todo por estar en los más difíciles.

Leave this world a little better than you found it.

Robert Baden-Powell

Resumen

A medida que se profundiza los problemas económicos actuales, es probable que aumente el hambre y la malnutrición, por lo que erradicarlos es uno de los grandes retos de nuestro tiempo. Por tal motivo, es importante buscar una alternativa tecnológica que acelere el crecimiento de las plantas para favorecer la economía familiar en México. Una técnica para incrementar el crecimiento de plantas como el maíz es el electro-cultivo, el cual consiste en la aplicación de un campo eléctrico con al menos un par de electrodos que se insertan en el suelo, dicho incremento se ha observado que se favorece al modificar superficies con óxidos de metales de transición como el $\text{RuO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \mid \text{Ti}$.

Para la construcción de los electrodos de $\text{RuO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \mid \text{Ti}$ se emplearon superficies de Ti que fueron modificadas utilizando diferentes concentraciones de RuO_2 y Ta_2O_5 mediante método electroforético aplicando 50 mA/cm^2 durante 20 min. Posteriormente, los electrodos se caracterizaron con técnicas electroquímicas y espectroscópicas para posteriormente ser empleados en el electro-cultivo de maíz.

De esta manera, en este trabajo de investigación se observó que el empleo de electrodos de $\text{RuO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \mid \text{Ti}$ utilizados en electro-cultivo favorece el incremento de la tasa de germinación de semillas y la tasa de crecimiento de plantas de maíz comparado con electrodos de $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \mid \text{Ti}$. Además, los electrodos de $\text{RuO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \mid \text{Ti}$ (30:70) generan una mejor homogeneidad de crecimiento en las plantas de maíz, así como incrementan la aparición de hojas en comparación con los electrodos de $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \mid \text{Ti}$ y a su vez con el suelo control. De esta manera, las propiedades edafológicas se notaron afectadas positivamente cuando se somete al tratamiento de electro-cultivo.

Nomenclatura

<i>Símbolo</i>	<i>Significado</i>
•OH	Radical Hidroxilo.
1D	Una dimensión.
2D	Dos dimensiones.
CA	Cerca del Ánodo.
CC	Cerca del Cátodo.
CD	Corriente Directa.
CE	Conductividad Eléctrica.
CIC	Capacidad de Intercambio Catiónico.
DR	Densidad Relativa.
DSA	Dimensionally Stable Anodes, Ánodos Dimensionalmente Estables.
E	Potencial en Volt.
EC	Electro-cultivo.
ISRIC	International Soil Reference and Information Centre.
MC	Media Celda.
Meq	Miliequivalente.
MO	Materia Orgánica.
NMX	Norma Mexicana.
NOM	Norma Oficial Mexicana.
pe	Pélico.
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
SEM	Microscopio de Barrido Electrónico.

Contenido

Dedicatorias	i
Agradecimientos	ii
Resumen	iii
Nomenclatura.....	iv
Contenido.....	v
Índice de Figuras	viii
Índice de Tablas.....	xi
1. Introducción.....	12
2. Marco Teórico	13
2.1. Suelo y su Clasificación	13
2.1.1. Suelo tipo Vertisol.....	16
2.2. Características edafológicas	16
2.3. La agricultura en México.....	17
2.4. Desarrollo de cultivos	18
2.5. Cultivos importantes.....	19
2.6. Maíz (<i>Zea mays L</i>).....	19
2.6.1. Botánica	19
2.6.2. Desarrollo vegetativo.....	22
2.6.3. Absorción de nutrientes	25
2.6.4. Exigencias del Cultivo.....	27
2.7. Métodos de germinación y crecimiento de plantas	27
2.8. Electro-cultivo	29
2.8.1. Electroodos	32
2.8.1.1. Deposito electroforético	34
3. Antecedentes.....	36
4. Justificación	39

Hipótesis	41
5. Objetivos.....	42
5.1. Objetivo General.....	42
5.2. Objetivos Específicos	42
6. Metodología.....	43
6.1. Construcción de las superficies de Ti modificadas con IrO ₂ -Ta ₂ O ₅ Ti, RuO ₂ -Ta ₂ O ₅ Ti mediante electroforesis.....	44
6.1.1. Pre-tratamiento de las placas de titanio	44
6.1.2. Modificación de los electrodos de Ti.....	45
6.2. Caracterización de las superficies de Ti modificadas con RuO ₂ -Ta ₂ O ₅ Ti mediante electroforesis	47
6.2.1. Caracterización electroquímica mediante la determinación de la ventana de potencial	48
6.2.2. Determinación de la generación de radical hidroxilo en presencia de coumarina por espectrofotometría de ultravioleta visible (UV-Vis).....	48
6.2.3. Evaluación morfológica mediante microscopía de barrido electrónico (SEM)	49
6.3. Toma de muestra y preparación de suelo para electro-cultivo	49
6.4. Evaluación de la germinación de semillas empleando las superficies modificadas.....	50
6.5. Evaluación del crecimiento de plantas de maíz (<i>Zea mays</i> L) empleando las superficies modificadas de RuO ₂ -Ta ₂ O ₅ Ti e IrO ₂ -Ta ₂ O ₅ Ti.....	51
6.6. Caracterización edafológica	53
6.6.1. Análisis de propiedades de suelos.....	54
6.6.2. Análisis de movilización de iones intercambiables en el suelo	54
7. Análisis de Resultados.....	55
7.3. Construcción de superficies modificadas de RuO ₂ -Ta ₂ O ₅ Ti.....	55
7.4. Caracterización de superficies modificadas de RuO ₂ -Ta ₂ O ₅ Ti	57

7.4.1.	Determinación de la ventana de potencial	57
7.4.2.	Determinación de la generación de radical hidroxilo, en presencia de coumarina por espectrofotometría de ultravioleta visible (UV-Vis).....	59
7.4.3.	Evaluación morfológica mediante microscopía de barrido electrónico (SEM)	62
7.5.	Porcentaje de germinación de las semillas de maíz (<i>Zea mays</i> L) durante el electro-cultivo	65
7.6.	Crecimiento y desarrollo de plantas de maíz (<i>Zea mays</i> L)	68
7.7.	Caracterización edafológica.	76
	Relación de pH y Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	89
	Relación de pH y Conductividad Eléctrica (CE).....	89
	Relación de pH y Porcentaje de Materia Orgánica (% MO)	89
	Relación de pH y potasio (K ⁺).....	90
	Relación de Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y potasio (K ⁺).....	90
	Relación de Conductividad Eléctrica (CE) y sodio (Na ⁺)	90
	Relación de Conductividad Eléctrica (CE) y potasio (K ⁺)	91
	Relación de Materia Orgánica (%MO) y potasio (K ⁺)	91
8.	Conclusiones.....	93
	ANEXOS	94
	Anexo 1: Materiales y Equipos	94
	Anexo 2: Determinación del área geométrica electro-activa.....	95
	Anexo 3: Técnicas de caracterización	97
	Anexo 4: Análisis de correlación.....	99
9.	Bibliografía.....	100

Índice de Figuras

Figura 1. Superficie relativa de los principales grupos de suelo en México, 2007 [10].....	15
Figura 2. Morfología de planta de maíz (creación propia).....	20
Figura 3. Emergencia de la radícula (A), coleóptilo (B) y raíces seminales (C) [35].....	23
Figura 4. Etapas de crecimiento del maíz [39].....	24
Figura 5. Distribución de nutrientes en el desarrollo de plantas de maíz: aniónicos (+) o catiónicos (-) (creación propia).....	26
Figura 6. Representación esquemática de la técnica de electro-cultivo [14].....	30
Figura 7. Representación esquemática del depósito electroforético, integrado por un ánodo (+) y un cátodo (-) sumergidos en una suspensión coloidal, en donde se observa la migración hacia el ánodo (+) y depósito de los compuestos en solución sobre el mismo (imagen modificada de la referencia [63]).....	34
Figura 8. Voltamperogramas cíclicos para verificar la ventana de potencial para cada electrodo de $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$ Ti modificado por depósito electroforético, inmersión y pintado en H_2SO_4 0.5M [64].....	37
Figura 9. Gráfico de Volcano de electro-catalizadores (tomada y mejorada de [71]).....	39
Figura 10. Relación lineal de energías de enlace [72].....	40
Figura 11. Esquema de la metodología general del proyecto.....	43
Figura 12. Representación de la constitución de las soluciones a diferentes concentraciones de rutenio y tantalio.	45
Figura 13. Esquema general de modificación de electrodos por método electroforético... ..	46
Figura 14. Mecanismo de formación de la 7-hidroxycoumarina en presencia de la coumarina con radical hidroxilo [64] [79] [80].....	48
Figura 15. Imagen fotográfica de celdas plásticas con suelo previo al electro-cultivo.....	49
Figura 16. Montaje de electrodos en la celda para el electro-cultivo.....	50
Figura 17. Montaje de celda para electro-cultivo con semillas <i>Zea mays</i> L.	51
Figura 18. Cámara de crecimiento empleada con las celdas que contenían solo suelo como control, así como las que contenían los electrodos de $\text{RuO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$ Ti e $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$ Ti.	52
Figura 19. Estructura de una plántula de maíz de dos hojas [33].....	53

Figura 20. División de celda para electro-cultivo cerca del ánodo (CA), media celda (MC) y cerca del cátodo (CC): A, B, C, D y E.....	54
Figura 21. Electrodo de Ti luego del ataque con sandblasting.	55
Figura 22. Voltamperogramas cíclicos (A) de electrodos modificados en concentración de 100% con sales de $\text{RuCl}_x\text{H}_2\text{O}$ y RuCl_3 , comparados con Ti desnudo y con electrodo modificado con Ta (100%), así como la densidad de corriente de los electrodos modificados con sales de rutenio (B) obtenidas en H_2SO_4 0.5M a 100mV/s.....	56
Figura 23. Gráfica de factor de rugosidad obtenido para cada electrodo modificado con Ru:Ta (C0=Ti desnudo, C1= 100:0, C2=70:30, C3=30:70, C4=0:100).....	57
Figura 24. Voltamperogramas cíclicos para los diferentes electrodos C0, C1, C2, C3, C4 en H_2SO_4 0.5M a 100mV/s.....	59
Figura 25. (A) Espectros de UV-Vis para los electrodos modificados de $\text{RuO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \mid \text{Ti}$ modificados a diferentes concentraciones de rutenio y de tantalio, después de 180 minutos comparados con el blanco (inicial). (B) Diferencia entre la absorbancia inicial y la final después de 180 minutos [Ru:Ta (C0=Ti desnudo, C1= 100:0, C2=70:30, C3=30:70, C4=0:100)].	61
Figura 26. Micrografías de barrido electrónico de las superficies de los electrodos C1, C2, C3 y C4 a 10 000 x (A) y 5 000 x (B).	63
Figura 27. Micrografías de barrido electrónico de las superficies de los electrodos C1, C2, C3 y C4 a 2 000x (A) y 1 000x (B).	64
Figura 28. Tasa de germinación promedio de semillas de maíz (<i>Zea mays L</i>) después de la aplicación de electro-cultivo empleando las superficies de $\text{RuO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \mid \text{Ti}$ (R) e $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \mid \text{Ti}$ (I), así como el suelo control (C).	65
Figura 29. Imagen fotográfica de la emergencia del coleóptilo al segundo día empleando el electrodo de $\text{RuO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \mid \text{Ti}$	66
Figura 30. Proceso de germinación en semillas de maíz (<i>Zea mays</i>) empleando las superficies de $\text{RuO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \mid \text{Ti}$ (R) e $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \mid \text{Ti}$ (I) durante la aplicación de electro-cultivo después de 1, 1.5, 2 y 3 días, así como el suelo control (C).....	67
Figura 31. Imágenes fotográficas del proceso crecimiento del maíz aplicando electro-cultivo del día 0 al día 7 empleando las superficies de $\text{RuO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \mid \text{Ti}$ (R) e $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \mid \text{Ti}$ (I), así como el suelo control (C).	69

Figura 32. Imágenes fotográficas del proceso crecimiento del maíz aplicando electro-cultivo del día 8 al día 11 empleando las superficies de $\text{RuO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \text{Ti}$ (R) e $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \text{Ti}$ (I), así como el suelo control (C).	70
Figura 33. Longitud promedio de tallo, radícula, hoja y vástago al finalizar el electro-cultivo empleando las superficies de $\text{RuO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \text{Ti}$ (R) e $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \text{Ti}$ (I), así como el suelo control (C).	71
Figura 34. Peso promedio de la raíz crecida (A) y vástago seco (B) en la celda control y el suelo con electro-cultivo empleando $\text{RuO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \text{Ti}$ y $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \text{Ti}$ cerca del ánodo (CA), media celda (MC), cerca del cátodo (CC) y total.....	73
Figura 35. Imagen fotográfica de la raíz (A) y radícula (B) seca dividida por secciones cerca del ánodo (CA), media celda (MC) y cerca del cátodo (CC) empleando las superficies de $\text{RuO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \text{Ti}$ (R) e $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \text{Ti}$ (I), así como el suelo control (C)....	74
Figura 36. Ancho promedio de tallo y de hoja después de electro-cultivo empleando las superficies de $\text{RuO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \text{Ti}$ (R) e $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \text{Ti}$ (I), así como el suelo control (C)....	75
Figura 37. Número de hojas promedio desarrolladas al finalizar el tratamiento de electro-cultivo (A). Imagen fotográfica que muestra el desarrollo de una planta con 5 hojas (B) empleando las superficies de $\text{RuO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \text{Ti}$ (R) e $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \text{Ti}$ (I), así como el suelo control (C).....	76
Figura 38. Influencia del pH en la solubilidad de nutrientes en el suelo [82].	79
Figura 39. Voltamperogramas cíclicos a diferentes velocidades de barrido en H_2SO_4 0.5M.	95

Índice de Tablas

Tabla 1. Clasificación de suelos de acuerdo a la textura [2].	13
Tabla 2. Ordenes de Suelo de acuerdo a la clasificación del Mapa Mundial de Suelos [9].	14
Tabla 3. Etapas, días y características del maíz durante su crecimiento [39].....	25
Tabla 4. Recopilación de estudios de aplicación de campo eléctrico al suelo para el crecimiento de plantas.	31
Tabla 5. Ventajas y desventajas de diferentes técnicas de depósito [63].	33
Tabla 6. Concentraciones (%) utilizadas en los electrodos modificados de Ru y Ta.	47
Tabla 7. Relación de concentraciones de Ru:Ta empleadas en este estudio.	58
Tabla 8. Absorbancia obtenida al inicio de la hidrólisis y luego de 180 minutos para cada electrodo modificado con Ru:Ta (C0=Ti desnudo, C1= 100:0, C2=70:30, C3=30:70, C4=0:100).....	60
Tabla 9. Parámetros evaluados que no presentan cambios en el suelo antes y después del electro-cultivo.	77
Tabla 10. Parámetros medidos del suelo control antes y después de la siembra de semillas.	78
Tabla 11. Niveles de materia orgánica (%) para un suelo arcilloso [43].....	80
Tabla 12. Resultados de la caracterización edafológica de celdas control y con electro- cultivo empleando $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \mid \text{Ti}$ y $\text{RuO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \mid \text{Ti}$, separados por secciones: CA (cerca del ánodo), MC (media celda) y CC (cerca del cátodo).	82
Tabla 13. Análisis del coeficiente de correlación entre las propiedades del suelo posterior al electro-cultivo para celda Control.	86
Tabla 14. Análisis del coeficiente de correlación entre las propiedades del suelo posterior al electro-cultivo para celda $\text{RuO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \mid \text{Ti}$	87
Tabla 15. Análisis del coeficiente de correlación entre las propiedades del suelo posterior al electro-cultivo para celda $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \mid \text{Ti}$	88

1. Introducción

A medida que se profundizan los problemas económicos mundiales, es probable que aumente el hambre y la malnutrición, por lo que erradicarlos es uno de los grandes retos de nuestro tiempo. La reducción de los ingresos y el aumento del desempleo disminuyen el poder adquisitivo de la población, por lo que 1 de cada 9 personas en el mundo no tienen suficiente alimento para comer, y 1 de cada 3 sufren alguna desnutrición [1].

Una manera de ayudar a enfrentar el problema que genera el hambre y la desnutrición es hacer que los cultivos crezcan más rápido y más grandes, lo cual se ha ido estudiando considerablemente en el campo de la agricultura [2].

El efecto que tiene la aplicación de electricidad al suelo durante el crecimiento vegetal se ha investigado desde principios del siglo pasado, donde se ha observado que induce la germinación de las semillas, aumenta y mejora el crecimiento de las plantas [2][3].

Este proyecto tiene como finalidad el uso de la técnica de electro-cultivo, que consiste en la aplicación de un campo eléctrico sobre el suelo de cultivo para incrementar el crecimiento de las plantas, el periodo de floración o la formación de semillas. Lo anterior utilizando electrodos modificados de $\text{RuO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$ | Ti.

El cultivo elegido para la aplicación de ésta técnica es el maíz debido a que forma parte de nuestra alimentación diaria, es el cultivo de mayor presencia en el país, constituye un insumo para la ganadería y para la obtención de numerosos productos industriales, por lo que, desde el punto de vista alimentario, económico, político y social, es el cultivo agrícola más importante [4].

2. Marco Teórico

2.1. Suelo y su Clasificación

El suelo puede definirse, de acuerdo con el glosario de la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (1984), como el material mineral no consolidado en la superficie de la tierra, que ha estado sometido a la influencia de factores genéticos y ambientales (material parental, clima, macro y microorganismos y topografía), actuando durante un determinado periodo [5].

El suelo es el producto de la interacción de varios factores, entre ellos están la roca madre, el tiempo, el clima, los organismos vivos y la topografía [6].

Además, el suelo juega un papel ambiental de suma importancia, ya que puede considerarse como un reactor bio-físico-químico en donde se descompone material de desecho que es reciclado dentro de él [7].

La clasificación de los suelos surge con el propósito de organizar su conocimiento para entender sus propiedades y entender las relaciones de estos con el ambiente [8]. Una forma de clasificar los suelos en términos generales es por la textura (**Tabla 1**), o sus órdenes de acuerdo a la Leyenda del Mapa Mundial de Suelos (**Tabla 2**)

Tabla 1. Clasificación de suelos de acuerdo a la textura [2].

Tipo de suelo	Características
Pedregosos	No retienen agua, no son buenos para el cultivo de plantas y están formados principalmente por partículas muy grandes (piedras).
Arenosos	Predominan las partículas de arena, por lo cual no retienen agua. Generalmente son suelos de color claro y, como no contienen materia orgánica, no suelen ser productivos para la agricultura.

Limosos	Tienen abundancia de partículas de tamaño medio, lo cual le confiere propiedades como retención de agua moderada, contienen gran cantidad de materia orgánica, pero se compactan mucho al secarse.
Arcillosos	Predominan las arcillas, son suelos casi impermeables y muy compactos en ausencia de agua. Contienen gran cantidad de materia orgánica.

Tabla 2. Ordenes de Suelo de acuerdo a la clasificación del Mapa Mundial de Suelos [9].

Categoría	Características
Acrisoles	Presentan un horizonte bien definido de arcillas.
Cambisoles	Suelos jóvenes con acumulación de arcillas.
Rendzinas	Suelos fértiles, pueden utilizarse con una rotación relativamente breve (de 3 a 5 años).
Gleysoles	Suelos con saturación de agua permanente.
Fluvisoles	Suelos jóvenes y la mayoría rica en calcio.
Phaeozems	Suelos utilizados principalmente como tierras de pastos groseros.
Litsoles	Suelos muy delgados, abarcan aproximadamente 10 cm de espesor y sostienen una vegetación baja.
Kastanozems	Altamente productivos porque poseen un elevado grado de fertilidad natural y un contenido moderadamente elevado de materia orgánica.
Luvisoles	Suelos con arcillas, saturados en bases (alta CIC), en cualquier clima, excepto tropical y subtropical.

Pedzoles	Suelos pedregosos o escarpados y no se prestan para la agricultura.
Arenosoles	Suelos con alto contenido de arena (hasta 125cm).
Regosoles	Suelos en formación a partir de material consolidado (roca madre).
Leptosoles	Suelos muy delgados (espesor <30 cm) sobre roca dura.
Vertisoles	Suelo con alto contenido de arcilla (>35 %) hasta 50 cm.
Xerosoles	Suelos áridos que contienen materia orgánica.
Calcisoles	Suelos con alto contenido de calcio (CaCO ₃). Suelos saturados de base, hasta 125cm.
Otros	Ferralsoles, Nitosoles, Histosoles, Solonetz, Andosoles, Planosoles, Yermosoles, Solochanks.

México es un país con una gran complejidad geológica, en donde existe una gran diversidad de rocas con características y orígenes distintos, lo que dio como resultado diferentes tipos de suelos. La gran diversidad edáfica que presenta México se representa por 26 grupos de suelo, en donde el conjunto de seis de ellos ocupan el 81.7% del territorio (**Figura 1**) [10].

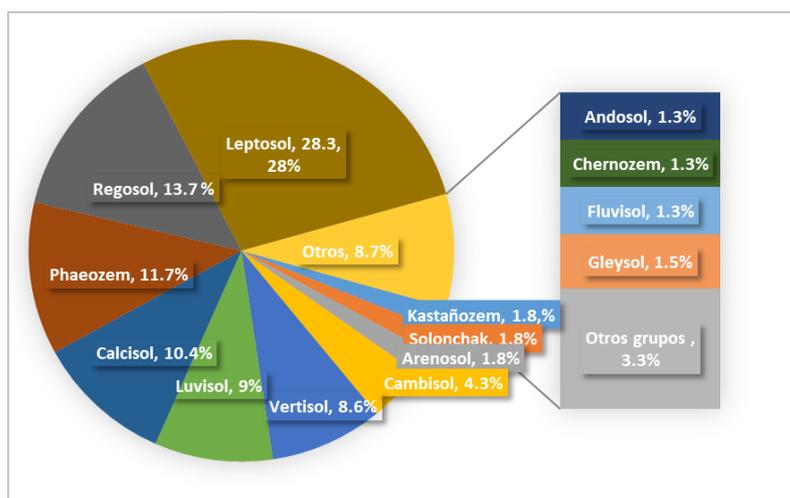


Figura 1. Superficie relativa de los principales grupos de suelo en México, 2007 [10].

2.1.1. Suelo tipo Vertisol

Son suelos de climas semiáridos a subhúmedos y de tipo mediterráneo, con marcada estacionalidad de sequía y lluvias. La vegetación natural que se desarrolla en ellos incluye sabanas, pastizales y matorrales. Estos suelos se pueden encontrar en los lechos lacustres, en las riberas de los ríos o en sitios con inundaciones periódicas; se caracterizan por su alto contenido de arcillas que se expanden con la humedad y se contraen con la sequía, lo que puede ocasionar grietas en esta última temporada. Esta propiedad hace que, aunque son muy fértiles este tipo de suelos, también sean difíciles de trabajar debido a su dureza durante el estiaje y a que son muy pegajosos en las lluvias (IUSS, 2007) [11]. En México, sus colores más comunes son el negro o gris oscuro en las zonas centro y oriente del país y el café rojizo hacia el norte. Su uso agrícola particularmente de riego, es muy extenso, variado y productivo. Además, estos suelos se utilizan para la producción de caña, cereales, hortalizas y algodón; tienen baja susceptibilidad a la erosión y alto riesgo de salinización [12].

Dentro de la clasificación de suelos, se encuentran definiciones de elementos formativos de segundo nivel, los cuáles se relacionan con los horizontes, propiedades y materiales de diagnóstico, atributos como color, condiciones químicas, textura, etc. [13].

2.2. Características edafológicas

La calidad del suelo es variable y los suelos responden de forma distinta de acuerdo a las prácticas implementadas sobre él. El suelo, junto con el agua son recursos naturales de gran importancia para el crecimiento de las plantas. El suelo proporciona un soporte mecánico y de nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas y el agua es esencial para los procesos de la vida de la planta [14]. Dentro de las diferentes propiedades del suelo, se encuentran:

- **Propiedades físicas:** Se refiere a aquellas propiedades visibles y de cambios lentos o imperceptibles, determinan varios procesos edafológicos claves tales como la capacidad de los usos a los que el hombre los sujeta. Dentro de las

propiedades físicas se encuentran: color, textura, humedad, conductividad eléctrica (CE), densidad real, densidad aparente, porosidad y permeabilidad.

- **Propiedades químicas:** Son propiedades no visibles y de cambios rápidos y perceptibles. La química de suelos está denominada por la interacción entre sus componentes sólidos (principalmente los compuestos insolubles de sílice calcio y aluminio) y su fase acuosa como el pH, materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico (CIC).
- **Propiedades biológicas:** Son aquellas que se observan de manera indirecta y dependen de los organismos que habitan en el suelo, dentro de ellas actividad enzimática, respiración basal (CO₂) y microorganismos.

2.3. La agricultura en México

La agricultura se puede definir como la producción, procesamiento, comercialización y distribución de cultivos. La agricultura desempeña un papel crucial en la economía de un país; es la columna vertebral de su sistema económico; no sólo proporciona alimentos y materias primas, sino oportunidades de empleo a una importante cantidad de población [15].

En México, la agricultura, en específico la tradicional es practicada en superficies pequeñas, con mano de obra principalmente familiar, con limitada aplicación de tecnologías y métodos modernos de producción, es destinada, en su mayoría, para el autoconsumo [16].

Los sistemas de cultivo tradicionales se caracterizan por tener una aplicación de conocimiento transmitido generacionalmente y denominado como “conocimiento tradicional” [17]. En la agricultura, es muy importante conservar el suelo para mantener la productividad, debido a que la capa superior se pierde y hay menor retención de agua ocasionando pérdida de soporte para las raíces, pérdida de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y otros elementos y nutrientes [18].

Con el paso del tiempo se han ido desarrollando nuevas técnicas de cultivo, así como tecnologías aplicables para mejorar los resultados de los cultivos, ya sea para la obtención de un producto de mejor calidad o para optimizar la producción de los mismos, ya sea mediante el consumo de insumos en menor cantidad o reduciendo el tiempo de germinación y/o producción [19].

Los avances tecnológicos más importantes aplicados a la actividad agrícola han sido el control de plagas y enfermedades de los cultivos, el suministro de nutrientes específicos al suelo, la introducción de nuevas especies modificadas genéticamente y la mecanización [19].

2.4. Desarrollo de cultivos

En la agricultura del país las siembras y cosechas, están relacionadas directamente tanto con las estaciones del año como con los periodos vegetativos de los cultivos. Esto permite que los cultivos se dividan en cuatro tipos [20]:

- ***Perenne:*** Este define a todos los cultivos de ciclo largo, es decir, que su periodo vegetativo se extiende más allá de doce meses y por lo regular una vez establecida la plantación, se obtienen varias cosechas. Ejemplo de ellos son la naranja, el aguacate y el cacao.
- ***Anuales o cíclicos:*** Son aquellos que su período vegetativo es menor a 12 meses y requieren de una nueva siembra para la obtención de cosecha; estos se concentran en dos periodos productivos, primavera/verano y otoño/invierno. Estos cultivos tienen como ventaja la posibilidad de sembrar y planificar la huerta, por lo que se puede cambiar de cultivo cuando se desee. El maíz, trigo y frijol pertenecen a este tipo de cultivo.
- ***Bienal:*** Son aquellos cuyo ciclo productivo se extiende a dos años; es decir, su cosecha tarda dos ciclos. La papaya, la piña y la fresa, son algunos ejemplos.
- ***Temporal:*** La producción de estos cultivos depende del comportamiento de las lluvias y de la capacidad del suelo para captar el agua. Al respecto, tienen la

ventaja de que el gasto en la producción es menor al no tener que invertir en el tema de riego. Algunos ejemplos son el maíz de temporal, el limón y el sorgo.

En México casi tres cuartas partes de la superficie agrícola se destinan a cultivos del tipo cíclico, 54% para primavera/verano y 17% para otoño/invierno, el 29% restante es superficie destinada a cultivos del tipo perenne [21] [22].

2.5. Cultivos importantes

La diversidad de tipos de suelo, clima y ecosistemas a lo largo del territorio nacional representa una amplia variedad de opciones para la producción agrícola, lo que hace de México un país en donde existen condiciones idóneas para cultivar gran diversidad de productos de todo tipo [23].

Existen cultivos que por su nivel de producción y el valor monetario que generan sus cosechas, se ubican entre los 10 productos principales de la actividad agrícola a nivel nacional, que según cifras oficiales de la Secretaría de Agricultura y Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) [23][24] son: **Caña de azúcar** (*Saccharum officinarum*) [24], **Aguacate** (*Persea americana*) [25], **Pastos** (*Cynodon dactylon*), **Sorgo** (*Sorghum*) [26], **Chile verde** (*Capsicum annuum*), **Tomate** (*Solanum lycopersicum*) [27], **Alfalfa** (*Medicago sativa* L)[28], **Trigo** (*Triticum sativum*) [29], **Papa** (*Solanum tuberosum*) [30] y **Maíz** (*Zea mays*) [31].

2.6. Maíz (*Zea mays* L)

El maíz es el cultivo de mayor presencia en México, el cual es un cereal que aporta muchos nutrientes y que forma parte de la alimentación diaria en la población mexicana [31] de ahí el interés de considerarlo en este tema de investigación.

2.6.1. Botánica

Botánicamente el maíz (*Zea mays*) pertenece a la familia de las gramíneas y es una planta anual alta, cuyos parientes silvestres los teocintles, se clasifican dentro del género

Zea perteneciente a la familia Gramínea o Poaceae, que incluye también a importantes cultivos agrícolas como el trigo, arroz, avena, sorgo, cebada y caña de azúcar [31].

La planta del maíz es de porte robusto, de fácil desarrollo y de producción anual, su fisonomía se presenta en la **Figura 2** [31]:

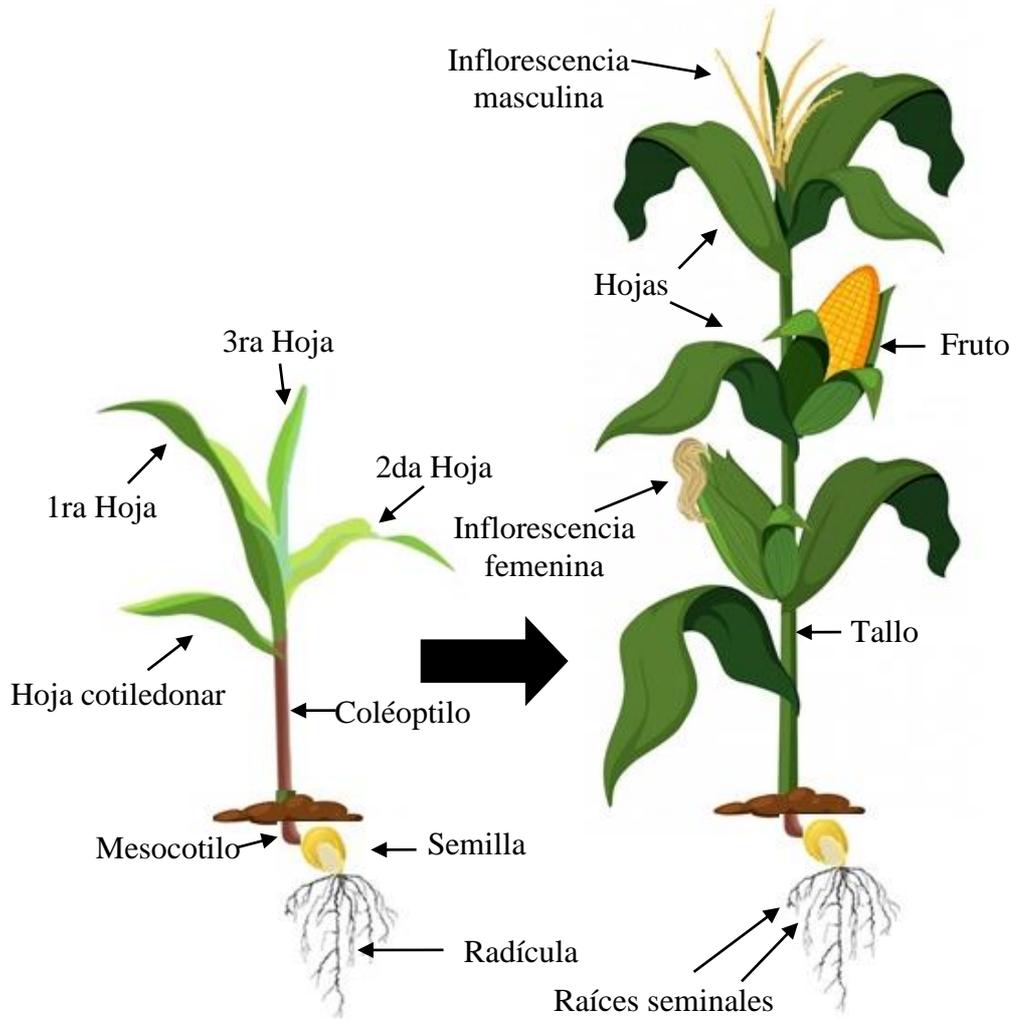


Figura 2. Morfología de planta de maíz (creación propia).

- **Semilla:** la semilla de maíz está contenida dentro de un fruto denominado cariósido, la capa externa que rodea a este fruto corresponde al pericarpio, estructura que se sitúa por sobre la testa de la semilla. La composición promedio de un cariósido de maíz perteneciente a la especie *Zea mays* L, con las siguientes características: humedad (12-13%), almidón (65-70%), azúcares (1-2%), proteína (10-11%), grasa (4-5%), fibra (2-2.5%), ceniza (1-2%) [32].

- **Tallo:** El tallo es erecto, de elevada longitud pudiendo alcanzar los 4 m de altura, es robusto y sin ramificaciones. Por su aspecto recuerda al de una caña, no presenta entrenudos y se muestra una médula esponjosa si se realiza un corte transversal [31].
- **Coléoptilo:** Estructura que emerge desde la semilla hacia arriba, se aproxima a la superficie del suelo a través de la elongación del mesocotilo [33], es en sí la primera hoja modificada de manera que se forma una especie de caperuza cerrada sobre las hojas siguientes.
- **Mesocotilo:** Estructura tubular, de color blanco y semejante a un tallo, aparece inmediatamente a continuación del coleóptilo, una vez que éste rompa la cubierta seminal. El crecimiento del mesocotilo, a partir de la semilla, permite dejar a la plántula a una distancia de 1 a 1.5 cm de la superficie del suelo [34].
- **Inflorescencia:** El maíz es de inflorescencia monoica con inflorescencia masculina y femenina separada dentro de la misma planta. En cuanto a la inflorescencia masculina presenta una panícula (vulgarmente denominadas espigón o penacho) de coloración amarilla que posee una cantidad muy elevada de polen en el orden de 20 a 25 millones de granos de polen. En cada florecilla que compone la panícula se presentan tres estambres donde se desarrolla el polen. En cambio, la inflorescencia femenina marca un menor contenido en granos de polen, alrededor de los 800 o 1000 granos y se forman en unas estructuras vegetativas denominadas espádices que se disponen de forma lateral [31].
- **Hojas:** Las hojas son largas, de gran tamaño, alternas, paralelinervias, es decir que se encuentran abrazadas al tallo y por el haz presenta vellosidades. Los extremos de las hojas son muy afilados y cortantes [31].
- **Radícula y raíces seminales:** Las raíces son fasciculadas y su misión es la de aportar un perfecto anclaje a la planta. En algunos casos sobresalen unos nudos de las raíces a nivel del suelo y suele ocurrir en aquellas raíces secundarias [31]. La radícula y raíces seminales son fundamentales hasta que la planta alcanza tres hojas.

2.6.2. Desarrollo vegetativo

Desde que se siembran las semillas hasta la aparición de los primeros brotes (coleóptilo), transcurre un tiempo de 6 a 8 días, donde se ve muy reflejado el continuo y rápido crecimiento de la plántula. Esa primera etapa se conoce como nascencia [31].

La germinación es la reanudación de la actividad enzimática bajo condiciones favorables de humedad y temperatura, lo cual promueve una aceleración en la división y elongación celular hasta que finalmente emerge el embrión a través de la cubierta de la semilla de maíz. El proceso de germinación se desencadena como consecuencia de la absorción de agua a través de la cubierta de la semilla, a dicha etapa se le da el nombre de imbibición, en esta etapa la semilla absorbe un 30 % de su peso seco en agua antes de comenzar a germinar [35]. Una absorción menor a la indicada puede ocasionar que se detenga o retrase el proceso germinativo a causa de un secado rápido de la zona en donde se encuentra la semilla. Los indicadores visuales de la germinación son:

- 1) ***emergencia de la radícula (Figura 3A)***, este fenómeno tarda de 2 a 3 días en lugares cálidos y con una adecuada humedad, pero puede también tardar hasta una o dos semanas cuando se tienen suelos secos y/o más frescos ($< 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) [35].
- 2) ***emergencia del coleóptilo (Figura 3B)***, puede ocurrir en uno o varios días dependiendo de la temperatura del suelo, esta estructura vegetal rígida es la encargada de abrir paso a través del suelo para la emergencia de la planta, en virtud de la elongación del mesocótilo [35].
- 3) ***emergencia de las raíces seminales laterales (Figura 3C)***. Cuando las condiciones de temperatura ($32\text{ a }35\text{ }^{\circ}\text{C}$) y humedad son adecuadas, las tres estructuras pueden emerger casi el mismo día. En suelos frescos la aparición del coleóptilo y las raíces seminales laterales se puede retrasar hasta por más de una semana después de que emerge la radícula [35].

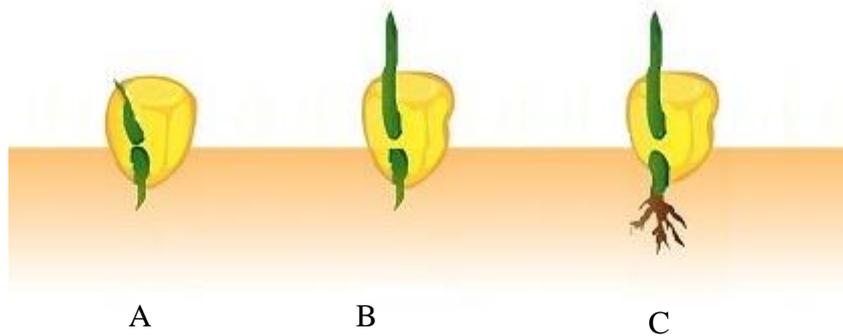


Figura 3. Emergencia de la radícula (A), coleóptilo (B) y raíces seminales (C) [35].

El maíz se adapta muy bien a toda clase de suelos, pero suelos con pH entre 6 a 7 son a los que mejor se adaptan [36]. También requieren suelos profundos, ricos en materia orgánica, con buena circulación del drenaje para no producir encharques que originen asfixia radicular [31].

El maíz necesita para su desarrollo ciertas cantidades de elementos minerales. Los defectos en la planta se manifiestan cuando algún nutriente mineral está en exceso. Para el crecimiento del maíz es recomendable un suelo rico en potasio (K) y fósforo (P), también un aporte de nitrógeno (N) en mayor cantidad sobre todo en época de crecimiento vegetativo [31]. El N, P, K y B (boro) tienen un impacto particular en la polinización de los granos y su tamaño, y por consiguiente tienen influencia directa sobre el rendimiento del maíz [37].

Por otra parte, no todas las plantas en el campo llegan a una etapa en particular, al mismo tiempo. Por lo tanto, los investigadores asumen que el cultivo alcanza una etapa específica cuando al menos el 50% de las plantas presentan las características correspondientes [38].

Los investigadores dividen las etapas de crecimiento en dos grandes categorías:

- Vegetativa (V).
- Reproductiva (R).

Además, las etapas de crecimiento (**Figura 4**) se pueden agrupar en cuatro grandes períodos [39]:

- Crecimiento de las plántulas (etapas VE y V1).
- Crecimiento vegetativo (etapas V2, V3... Vn).
- Floración y fecundación (etapas VT, R0, y R1).
- Llenado de grano y madurez (etapas R2 a R6).

Además, en la **Tabla 3** se presentan las etapas, días y características del maíz durante su crecimiento [39]:

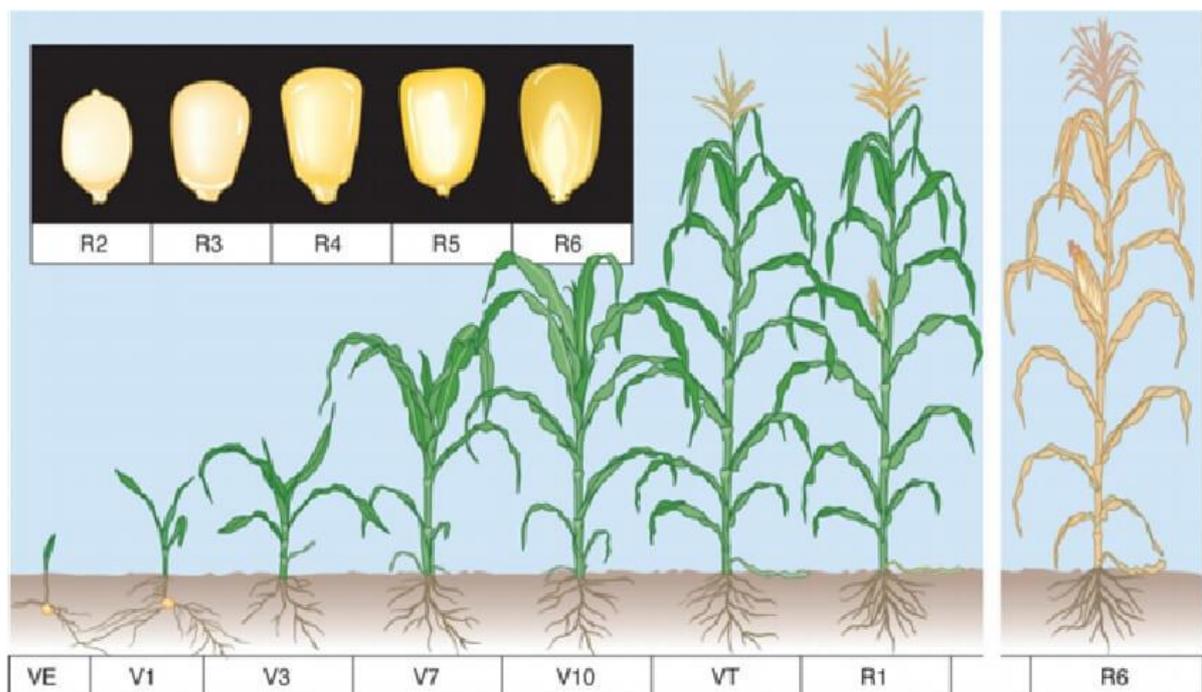


Figura 4. Etapas de crecimiento del maíz [39].

Tabla 3. Etapas, días y características del maíz durante su crecimiento [39].

Etapa	Días	Características
VE	5	El coléoptilo emerge de la superficie del suelo.
V1	9	Es visible el cuello de la primera hoja.
V2	12	Es visible el cuello de la segunda hoja.
Vn		Es visible el cuello de la hoja número “n”.
VT	55	Es completamente visible la última rama de la panícula.
R0	57	Antesis o floración masculina.
R1	49	Son visibles los estigmas.
R2	71	Etapa de ampolla. Los granos se llenan con un líquido claro y se puede ver el embrión.
R3	80	Etapa lechosa. Los granos se llenan con un líquido lechoso blanco.
R4	90	Etapa masosa. Los granos se llenan con una pasta blanca. El embrión tiene aproximadamente la mitad del ancho del grano.
R5	102	Etapa dentada. La parte superior de los granos se llena con almidón sólido y, cuando el genotipo es dentado, los granos adquieren la forma dentada. En los tipos tanto cristalinos como dentados es visible una "línea de leche" cuando se observa el grano desde el costado.
R6	112	Madurez fisiológica. Una capa negra es visible en la base del grano. La humedad del grano es generalmente de alrededor del 35%.

2.6.3. Absorción de nutrientes

La mayoría de la materia seca producida por la planta consiste en materiales orgánicos de carbono que resultan de la fotosíntesis y de los procesos subsecuentes, requieren de 16 elementos químicos para que la planta se desarrolle y sea productiva. Un abastecimiento de la cantidad adecuada de cada nutriente durante cada una de las etapas de desarrollo de la planta es esencial para el desarrollo óptimo del cultivo [40].

La absorción de nutrientes (**Figura 5**) por la planta se inicia antes de que esta "emerja" del suelo. Las cantidades de nutrientes absorbidos por [las plántulas durante las etapas tempranas de desarrollo no son grandes, aun así, la concentración de nutrientes debe ser alta cerca de la raíz de la plántula en desarrollo. La absorción de K^+ por la planta se detiene prácticamente después de la aparición de los granos, pero la absorción de otros nutrientes como el nitrógeno y el fósforo sigue hasta muy cerca de la madurez de la planta. Parte del nitrógeno y fósforo, así como otros nutrientes esenciales para la planta, se mueven de las partes vegetativas (hojas y tallo) de la planta hacia los granos en desarrollo durante las etapas finales de crecimiento del maíz. Esta translocación puede resultar en deficiencias en las hojas a menos que cantidades adecuadas de nutrientes estén disponibles para la planta durante ese periodo de crecimiento. Una gran proporción del nitrógeno y fósforo que la planta de maíz absorbe se encuentra en el grano, la mayoría del K^+ absorbido se regresa al suelo en las hojas, tallos y otras partes de la planta. Aun cuando la cantidad de nutrientes absorbida es relativamente pequeña, el tamaño final de las hojas, tallo, mazorca y otras partes de la planta dependen en gran medida de la disponibilidad adecuada de nutrientes durante este periodo inicial de desarrollo de la planta [40].

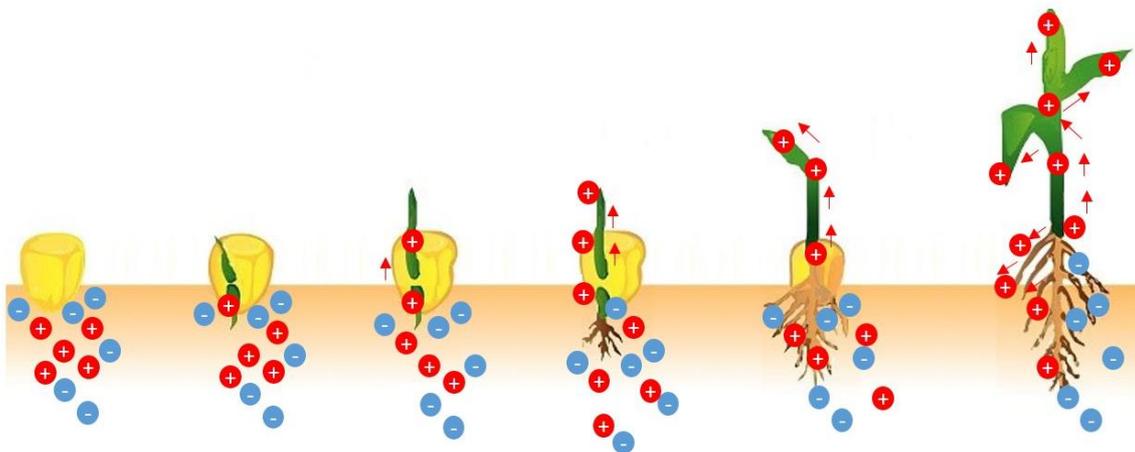


Figura 5. Distribución de nutrientes en el desarrollo de plantas de maíz: aniónicos (+) o catiónicos (-) (creación propia).

2.6.4. Exigencias del Cultivo

Para que un cultivo de maíz se desarrolle de manera adecuada, existen una serie de condiciones óptimas:

La temperatura más favorable para la nascencia se encuentra próxima a los 15°C. En la fase de crecimiento, la temperatura ideal se encuentra comprendida entre 24 y 30°C. Por encima de los 30°C se encuentran problemas en la actividad celular, disminuyendo la capacidad de absorción de agua por las raíces [41].

Las noches cálidas no son beneficiosas para el maíz, pues es la respiración muy activa y la planta utiliza importantes reservas de energía a costa de la fotosíntesis realizada durante el día. Si las temperaturas son excesivas durante la emisión de polen y el alargamiento de los estilos pueden producirse problemas. Si sobrevienen heladas antes de la maduración sin que haya producido todavía la total transformación de los azúcares del grano en almidón, se interrumpe el proceso de forma irreversible, quedando el grano blando y con un secado mucho más difícil, ya que, cuando cesa la helada, los últimos procesos vitales de la planta se centran en un transporte de humedad al grano [32][41].

Otra de las variables importantes para el desarrollo del maíz, es la humedad, ya que éste necesita grandes cantidades de agua, lo cual condiciona el área del cultivo. Las mayores necesidades corresponden a la época de la floración, comenzando 15 o 20 días antes de ésta, período crítico de necesidades de agua [42]. El pH del suelo también es de suma importancia en el cultivo de maíz, el cual se adapta a diferentes suelos, pero el idóneo es aquél con un pH comprendido entre 6 y 7 [43].

2.7. Métodos de germinación y crecimiento de plantas

La agricultura en el siglo XXI se enfrenta a múltiples retos, como lo es el producir más alimentos a fin de alimentar a una población creciente, así como más materias primas para un mercado de la bioenergía potencialmente enorme y se prevé que la población mundial aumente en más de un tercio, o 2300 millones de personas, entre 2009 y 2050 [44].

La agricultura contribuye al desarrollo económico, como medio de subsistencia y como proveedora de servicios ambientales, ya que crea oportunidades de inversión para el sector privado. Dos tercios del valor agregado de la agricultura se genera en los países en desarrollo donde es responsable, en promedio, del 29 % del producto interno bruto (PIB) y emplea al 65 % de la fuerza laboral [45].

El rendimiento de los cultivos ya sea vegetativo o reproductivo depende en gran medida del acceso a un suministro adecuado de nutrientes minerales esenciales, por lo cual el uso de fertilizantes y pesticidas es una práctica común en las actividades agrícolas, aunque los efectos nocivos sobre el ambiente y la salud humana de estos son bien conocidos [46]. Es por esto que en los últimos años se han generado alternativas para mejorar la calidad de los cultivos consumidos por el hombre, entre los que destacan los organismos genéticamente modificados, aunque esta tecnología tiene poca aceptación entre la población debido al poco entendimiento de sus fundamentos y los problemas socio-culturales y ecológicos que representa [47].

Existen otras alternativas biotecnológicas como cultivo *in vitro*, hidroponía, cultivo agroecológico que se han implementado para aumentar la producción de hortalizas, pero estas tecnologías suelen ser costosas, requieren de transferencia de las plantas entre distintas matrices, lo cual disminuye la viabilidad de los cultivos debido al estrés al que son sometidas y esto conduce a la necesidad de evaluar tecnologías alternativas que permitan que las plantas aumenten su productividad [2] [48] [49] [50].

Hoy día, la mayoría de las técnicas de cultivo han sido desarrolladas mediante la aplicación de diferentes campos de investigación, que van desde la forma en que se aplica el riego, la selección del cultivo destinado a la siembra, el uso de productos orgánicos para la fertilización hasta la aplicación o intervención de procesos químicos y genéticos, tal es el caso de la aplicación de la electroquímica como campo de investigación y desarrollo para la innovación de tecnologías nuevas para el cultivo [19] [51].

2.8. Electro-cultivo

La técnica de electro-cultivo (EC) consiste en la aplicación de un campo eléctrico sobre el suelo de cultivo, con el fin de incrementar el crecimiento de las plantas. La tecnología EC puede acelerar las tasas de crecimiento de las plantas y mejorar la calidad de los cultivos [52]. En esta técnica, se aplica electricidad a las semillas o a las plantas directamente a través del suelo y se ha comprobado que también puede proteger a dichas plantas de enfermedades, insectos y heladas [14] [48].

Se ha documentado que el crecimiento de las plantas, así como los procesos biológicos para la germinación de semillas pueden ser acelerados o inhibidos utilizando campos eléctricos de alta intensidad, (0.1 a 0.2V/cm) el mecanismo por el cual ocurre este fenómeno no es totalmente claro aún, pero se ha asumido que el tratamiento electrostático aumenta el vigor de las semillas ya que influye sobre los procesos bioquímicos que están relacionados con los radicales libres o estimulando la actividad de proteínas y enzimas [53].

El proceso del electro-cultivo consiste en preparación del suelo y realización de un análisis inicial, humectación del suelo, inserción de electrodos, aplicación de pretratamiento durante 4 h, siembra de semillas, proceso de germinación de 7 a 10 días [54]. En ésta técnica se han empleado diferentes electrodos desnudos y modificados, los cuales han permitido la generación de radicales hidroxilos para promover diferentes fenómenos de transporte durante el electro-cultivo [54].

En la **Figura 6** se esquematiza el proceso de electro-cultivo, en la que se muestran los procesos que ocurren cuando se aplica un campo eléctrico para potenciar el desarrollo de las plantas, entre la que se encuentra la electro-migraciones de iones que es el movimiento de nutrientes de acuerdo a su carga a un electrodo u otro [2].

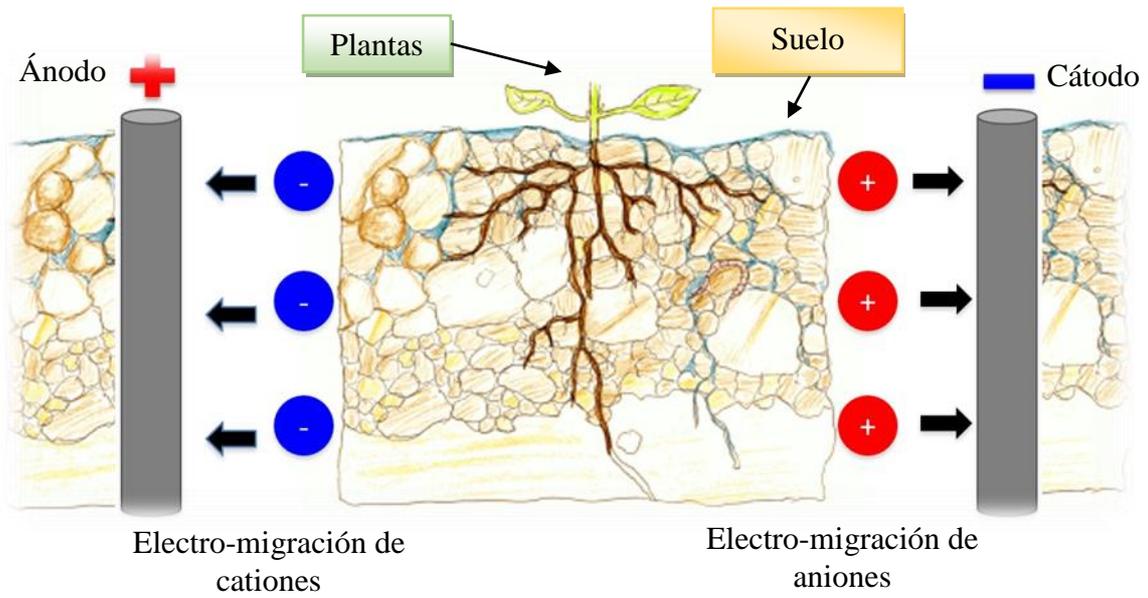


Figura 6. Representación esquemática de la técnica de electro-cultivo [14].

En la **Tabla 4** se muestra una recopilación de algunos trabajos en los que se ha estudiado la aplicación de campos eléctricos sobre las plantas para acelerar así su desarrollo.

Tabla 4. Recopilación de estudios de aplicación de campo eléctrico al suelo para el crecimiento de plantas.

Aportación	Referencia
Experimentos para aumentar el crecimiento de plantas utilizando electricidad.	Mambray (1746) [55]
Efecto de la imposición de electricidad sobre plantas donde describe los experimentos del Sr. J. E. Newman, empleando electricidad como estimulante para aumentar el desarrollo de plantas en gran escala.	J. H. Priestley (1925) [56]
Efecto de aplicar corriente eléctrica débil directamente sobre la raíz similar a las existentes naturalmente en plantas utilizando electrodos en placa colocados uno frente al otro en ambos extremos de la cama de germinación y utilizando corrientes de intensidad baja de 0.2 a 0.4 mA, lo cual incrementaba la productividad entre un 22 a 58%.	C. S. Dorchester (1937) [57]
Efecto de la aplicación de ligeros incrementos de corriente directa y el desarrollo de plantas de tomate, encontrando incrementos significativos en el desarrollo del 5 al 30%, además de un aumento en la captura de iones tales como K, Ca y P cuando se aplicaron corrientes de 15 y 3 μ A utilizando electrodos no polarizados a cada planta.	J. D. Black (1971) [58]
Aumento en el número de inflorescencias, además de un incremento de altura de alrededor del 15% en distintas plantas tratadas con iones aéreos tales como CO ₂ ⁺ después de 45 días.	H. A. Pohl y G. W. Todd (1981) [59]
Estudio para verificar el efecto de pulsos eléctricos sobre plantas de lechuga y pimiento aplicando corriente directa con valores de 2, 4, 6, 8 y 10V intercambiando el ánodo y el cátodo periódicamente y observaron que el desarrollo de plantas de lechuga y pimiento incrementaron cuando se aplicó un voltaje de 4 a 10 V encontrando que las comunidades bacterianas y la superficie de las raíces no se vieron afectadas.	J. Yeong Yi y col. (2012) [60]
La electro-estimulación de plantas puede generar comunicación intra e intercelular en forma de señales eléctricas.	E. Jomanov y A. G. Volkov (2012) [61]
Influencia de los factores físicos en el desarrollo de la planta, mediante la estimulación de la planta por campos electromagnéticos, ultrasonido y radiación ionizante.	Anna Aladjadjiyan (2012) [62]

2.8.1. Electroodos

Un electrodo es una fase o material por el cual es transportada la carga a través del movimiento de electrones [63]. Los electrodos empleados durante el tratamiento electroquímico de suelos pueden estar constituidos solamente por un material (carbón, acero, titanio, entre otros) o bien, este material puede estar recubierto con una gran diversidad de compuestos que proveen propiedades diferentes al electrodo. En general el objetivo de modificar un electrodo es aumentar el control cinético y termodinámico a nivel interfacial, mejorando el rendimiento de los mismos, ya que les permite tener selectividad, aumentar su resistencia mecánica, incrementar sus propiedades electrocatalíticas, brindarles protección contra la corrosión, entre muchos otros beneficios [64] [65]. Lo anterior debido a que la película colocada en la superficie del electrodo le confiere nuevas propiedades electroquímicas, ópticas, eléctricas, de transporte, entre otras propiedades deseables [65].

Existen diferentes técnicas para modificar los electrodos empleados durante el tratamiento electroquímico y así crear recubrimientos que podrían ayudar a mejorar la eficiencia con la que trabajan dichos electrodos, entre ellas se encuentran el depósito electroforético, pintado, inmersión, goteo sputtering [63] [65]. Para seleccionar la mejor técnica de depósito para el recubrimiento se hace un análisis de las características del mismo. En la **Tabla 5** se muestra un comparativo de las ventajas y desventajas para las técnicas de depósito.

Tabla 5. Ventajas y desventajas de diferentes técnicas de depósito [63].

Técnica de depósito	Ventajas	Desventajas
Electro-depósito	<ul style="list-style-type: none"> *Posible automatización. *Recubrimiento uniforme y reproducible. *Posible modificación de superficies de geometría compleja. 	<ul style="list-style-type: none"> *Se requiere de una suspensión estable sin sedimentos.
Pintado	<ul style="list-style-type: none"> *Sencillo. *Bajo costo de inversión. *Corto tiempo de aplicación. 	<ul style="list-style-type: none"> *Reproducibilidad en función del operador. *Control deficiente de factores como el grosor del recubrimiento.
Inmersión	<ul style="list-style-type: none"> *Bajo costo de inversión. *Posible modificación de superficies de geometría compleja. 	<ul style="list-style-type: none"> *Se requiere de una suspensión estable sin sedimentos.
Sputtering	<ul style="list-style-type: none"> *Posible automatización. *Recubrimiento uniforme y reproducible. 	<ul style="list-style-type: none"> *Se requiere equipo especializado.
Goteo	<ul style="list-style-type: none"> *Bajo costo de inversión. *Sencillo. 	<ul style="list-style-type: none"> *No es posible modificar superficies de geometría compleja.

2.8.1.1. Depósito electroforético

El depósito electroforético o electroquímico, es conocido desde 1808 cuando el científico ruso Ruess observó que un campo eléctrico inducía el movimiento de partículas de arcilla en agua. Pero hasta 1933 ocurrió el primer uso práctico de esta técnica, cuando se depositaron partículas de torio sobre un cátodo de platino y fue patentado en E.U.A. [66].

De esta manera, se define como depósito electroforético a aquel proceso electroquímico en el cual se sumergen dos o más electrodos en una suspensión; este proceso funciona al aplicar una corriente eléctrica entre al menos un par de superficies conductoras, las cuales se encuentra inmersas en una suspensión, con ello se obtienen recubrimientos sobre materiales conductores [63] [66].

Existen dos tipos de depósito electroforético dependiendo del electrodo de depósito (**Figura 7**). Cuando las partículas están cargadas positivamente, el depósito ocurre en el cátodo y el proceso se denomina depósito electroforético catódico, por otro lado, el depósito de partículas cargadas negativamente sobre el electrodo positivo (ánodo) se denomina depósito electroforético anódico [66] [67].

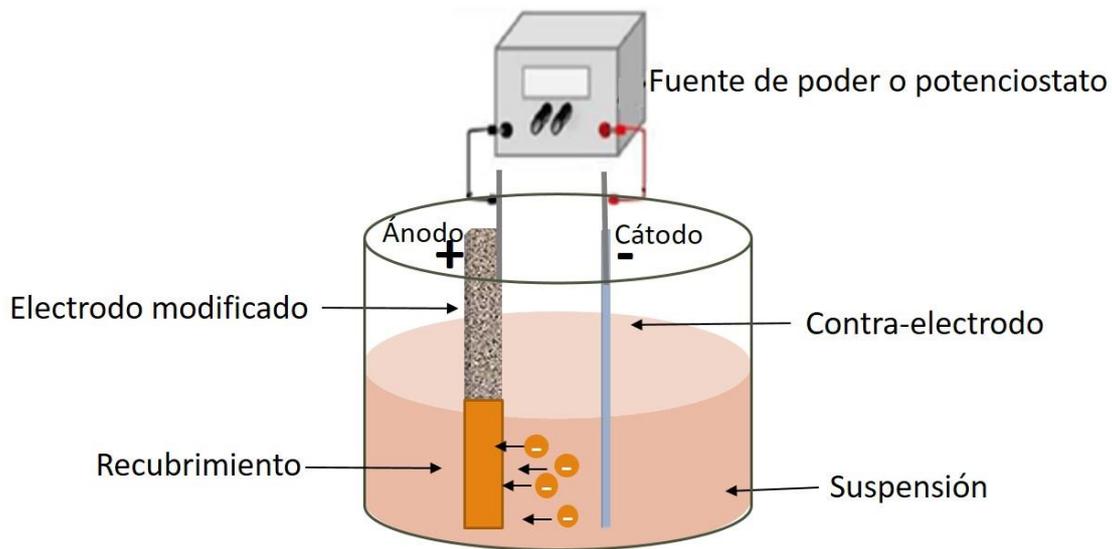


Figura 7. Representación esquemática del depósito electroforético, integrado por un ánodo (+) y un cátodo (-) sumergidos en una suspensión coloidal, en donde se observa la migración hacia el ánodo (+) y depósito de los compuestos en solución sobre el mismo (imagen modificada de la referencia [63]).

Dentro de las ventajas que tiene el depósito electroforético están [64]:

- Rapidez.
- El depósito puede ser automatizado y realizado por una sola persona.
- Recubrimientos uniformes y reproducibles sin cambios representativos en función de la persona que lo realice.
- Permite la modificación de electrodos con formas complejas.

La mayor limitación de esta tecnología recae en la naturaleza misma de la partícula a depositar (coloide), si esta se sedimenta [64].

3. Antecedentes

Distintos estudios han analizado la relación entre la aplicación de campos eléctricos y el crecimiento de las plantas, dentro de los trabajos realizados referentes al efecto de la electricidad sobre el crecimiento de las plantas se tienen los publicados por Blackman en 1924, dónde se muestra una posible actividad biológica asociada a la aplicación de una corriente alterna de 6.6 kV [55].

En el año 1985, Méndez Berlanga realizó un estudio sobre el tratamiento electrohidropónico en maíz [68], y analizó la cinemática de crecimiento de este recurso agrícola, dicho estudio marca el inicio del desarrollo de una técnica de tratamiento electrohidropónico que tiende a aumentar y estabilizar la velocidad de crecimiento de maíz.

Por otra parte, dentro del grupo de investigación en CIDETEQ se elaboraron y caracterizaron electrodos modificados, constituidos por una placa de titanio recubierta con una combinación de óxidos de iridio y tantalio ($\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \mid \text{Ti}$). El IrO_2 se utiliza debido a su alta resistencia a la corrosión y su actividad electroquímica, por otro lado, el Ta_2O_5 destaca por ser electroquímicamente estable, y suele utilizarse como agente estabilizador, ayudando así a mejorar el tiempo de vida útil del recubrimiento [63]. En esta investigación se probaron diferentes técnicas de modificación de electrodos (inmersión, pintado y electroforesis), identificando como la mejor técnica de síntesis al depósito electroquímico, y obteniendo a través de éste dichas superficies.

Se determinó el potencial de evolución para cada electrodo, utilizando una celda de tres electrodos en condiciones ácidas (H_2SO_4 0.5M) (**Figura 8**), mostrando que el electrodo modificado por depósito electroforético tiene una mayor ventana de potencial hacia oxidación, comparado con los métodos de inmersión y pintado, sugiriendo que el modificado electroforéticamente tiene mejores propiedades electro-catalíticas.

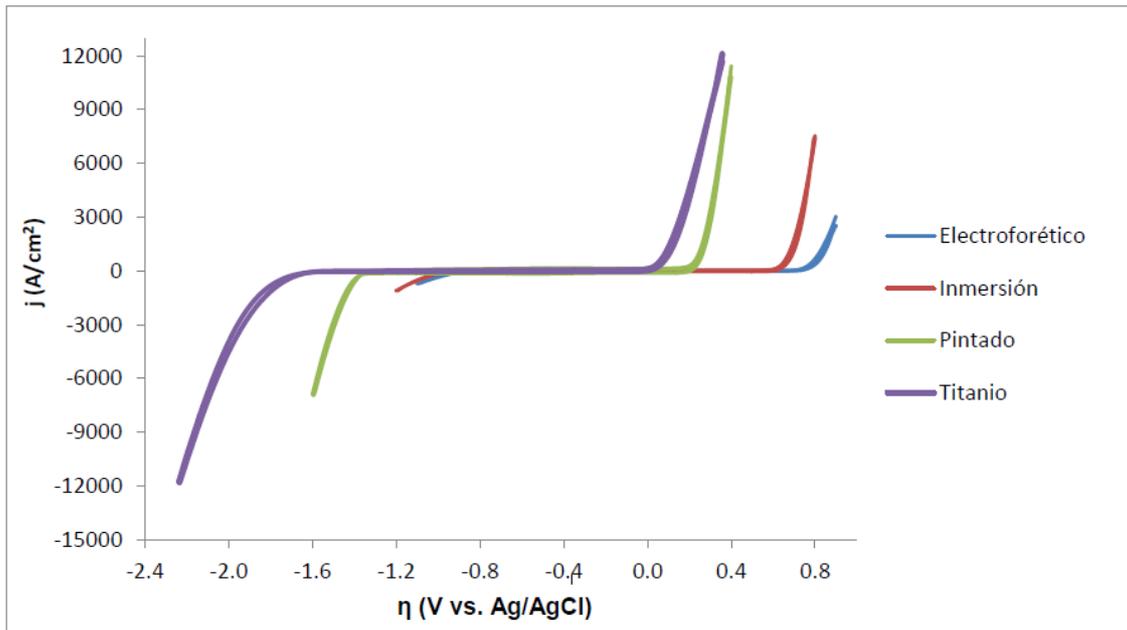


Figura 8. Voltamperogramas cíclicos para verificar la ventana de potencial para cada electrodo de $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5 \mid \text{Ti}$ modificado por depósito electroforético, inmersión y pintado en H_2SO_4 0.5M [64].

Se probaron también diferentes tipos de concentraciones de Ir y Ta, resultando mejor la combinación de 30:70 (30% Ir, 70% Ta) [69].

Por otro lado, también dentro del grupo de investigación debido a la demanda creciente de alimentos en el mundo, así como el incremento de la población, que conlleva a una sobreexplotación de los recursos naturales, incluyendo el suelo, nació el interés de generar alternativas que ayuden a mitigar los efectos de la degradación de este valioso recurso, dado que es uno de los principales sustentos para la vida en la tierra [2]. Se abordó el tema del mejoramiento de suelos, por medio de la técnica de electro-cultivo, la cual es una tecnología promisoría para incrementar las poblaciones vegetales, así como su rendimiento y puede ser aplicado tanto en plantas de importancia ambiental como económica [2].

Se implementó la técnica de electro-cultivo en diferentes metabolismos de fijación de carbono: C3, C4 y CAM, mostrando para todos los casos una respuesta favorable al campo eléctrico, entre 0.1 y 0.2V/cm utilizando $\text{Ti} \mid \text{Ti}$ o $\text{IrO}_2\text{Ta}_2\text{O}_5 \mid \text{Ti} \mid \text{Ti}$ tanto en

configuración 1D y 2D [14], así como una imposición de corriente alterna, directa y directa con imposición de potencial.

Los electrodos utilizados a lo largo de este estudio incluyen titanio como material catódico, además de láminas de grafito y varillas de acero inoxidable y aluminio para algunos estudios a nivel laboratorio. Además, se emplearon electrodos modificados $\text{IrO}_2\text{Ta}_2\text{O}_5|\text{Ti}$ preparados de acuerdo a las especificaciones descritas en el grupo de trabajo como material anódico en estudios a nivel laboratorio, piloto y campo [70]. De esta manera, se determinaron las mejores condiciones para llevar a cabo el electrocultivo: imposición de corriente directa con un campo eléctrico de 0.2V/cm utilizando un arreglo 2D con ánodos de $\text{IrO}_2\text{Ta}_2\text{O}_5|\text{Ti}$ | y cátodos de Ti.

Además, se ha reportado en la literatura que se favorece la reacción de evolución de oxígeno empleando ánodos de $\text{Ir}_x\text{Ru}_{1-x}\text{O}_2$, así como de $\text{RuO}_2\text{-IrO}_2$, de ahí que en este proyecto de investigación se propone desarrollar superficies modificadas por electroforesis con óxidos de Ta y Ru sobre soportes de Ti para la germinación de semillas y crecimiento de plantas de maíz.

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.

ANEXOS

Anexo 1: Materiales y Equipos

- **Material y equipo utilizado en la modificación de electrodos:**
 - Lámina de Titanio (espesor 0.003 cm área de 0.75 cm y pureza 99.6%) Proveedor “TEPSA” Titanio y equipos de proceso S.A. de C.V.
 - Ruthenium (III) Chloride hydrate (40-43% Ru) Strem Chemicals.
 - Ruthenium (III) Chloride (45-55%) Strem Chemicals.
 - TaCl₅ (99.99%) J.T Baker.
 - HCl , CAS 320331 marca J.T Baker.
 - 2-Propanol (alcohol isopropílico con CAS 9084-03, marca J.T Baker.
 - Electrodo de platino como contraelectrodo.
 - Potenciostato marca Epsilon.
 - Parrilla de agitación de la marca Bio Magnetic Stirrer MMS-3000 BIOSAN.

- **Material y equipo utilizado en la caracterización de electrodos:**
 - Coumarin (HPLC), con número CAS 91-64-5 de la marca SIGMA-ALDRICH, pureza superior al 99%.
 - H₂SO₄ con CAS 9681-05, marca J.T Baker, pureza 65.9%.
 - Potenciostato marca Basi Epsilon.
 - Fuente de poder marca EZ Digital Co., Ltd, voltaje 50/60 Hz, DC Power Supply.
 - Espectrometro de absorción UV-visible LAMBDA XLS PerkinElmer.

- **Material y equipo utilizado en la germinación y crecimiento de plantas:**
 - Semillas *Zea mays L.*
 - Cloro comercial (10%).
 - Suelo tipo Vertisol pélico.
 - Celdas plásticas.
 - Cámara de crecimiento.
 - Fuente de poder marca EZ Digital Co., Ltd, voltaje 50/60 Hz, DC Power Supply.
 - Temporizador (timer) para 24 horas, marca Steren.
 - Serie de caimanes.
 - Electrodos cilíndricos de titanio, modificados.

Anexo 2: Determinación del área geométrica electro-activa

El área geométrica se calcula con la medición de la superficie de trabajo, al tratarse de rectángulos, se usa la fórmula de base por altura. Para el cálculo del área geométrica electro activa se obtuvieron los voltamperogramas cíclicos a diferentes velocidades de barrido: 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180 y 200 mV s^{-1} . Con estos voltamperogramas cíclicos se evaluó el área geométrica electro-activa de los electrodos modificados empleando el método de capacitancia de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$i = \left(\frac{dq}{dt}\right)\left(\frac{dE}{dE}\right) = \left(\frac{dq}{dE}\right)\left(\frac{dE}{dt}\right) = C \quad \text{Ecuación 1}$$

Para obtener los datos de la **Figura 39**, la capacitancia normal (C_{st}) se consideró como 60 F cm^2 para electrodos rugosos de acuerdo a lo reportado [64] [69][101][102] [103].

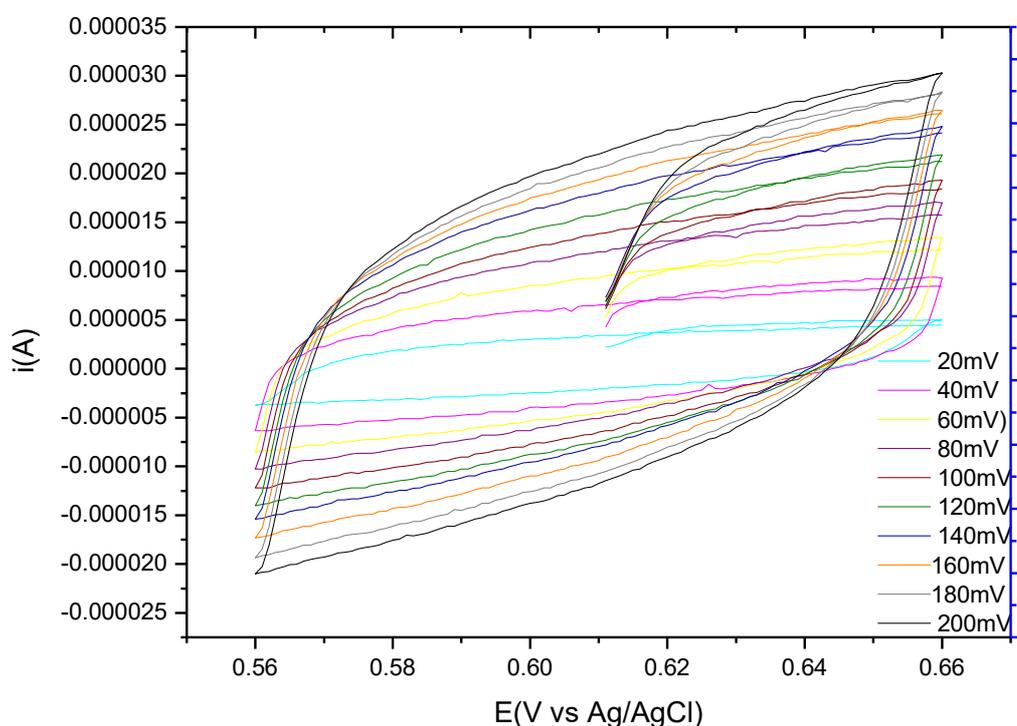


Figura 39. Voltamperogramas cíclicos a diferentes velocidades de barrido en H_2SO_4 0.5M.

De esta manera, la corriente capacitiva (i_{cap}) se calcula de acuerdo a

$$i_{cap} = \frac{i_a + i_c}{2} \quad \text{Ecuación 2}$$

La cual presenta un comportamiento lineal respecto a la velocidad de barrido (v), en donde la pendiente genera la capacitancia de la doble capa (C_{dl}), entonces el área electro-activa se calcula con la ecuación:

$$A_{ea} = \frac{C_{dl}}{C_{st}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde: C_{dl} (F), C_{st} ($F \text{ cm}^{-2}$), A (cm^2).

Anexo 3: Técnicas de caracterización

▪ **Voltamperometría Cíclica**

La ventana de potencial de cada electrodo considerado en este trabajo de tesis se analizó por voltamperometría cíclica, esta técnica permite identificar reacciones de oxidación y reducción que suceden en la superficie del electrodo. Esta técnica consiste en variar de forma cíclica el potencial de un electrodo colocado en una solución y medir la corriente resultante, ésta señal de excitación triangular de potencial barre el potencial del electrodo de trabajo en dirección de ida y vuelta entre dos valores designados. El triángulo regresa a la misma velocidad y permite la visualización de un voltamperograma completo. Los potenciales a los cuáles se lleva a cabo el cambio de potencial son conocidos como potenciales de inversión. La excitación cíclica puede realizarse a diferentes velocidades (velocidades de barrido).

Dentro de los parámetros que se miden en un voltamperograma cíclico son el potencial de pico catódico (E_{pc}), potencial de pico anódico (E_{pa}), corriente de pico catódico (i_{pc}) y la corriente de pico anódico (i_{pa}) [104].

▪ **Espectrofotometría de ultravioleta visible (UV-Vis)**

La espectroscopia visible es una de las técnicas más ampliamente y más frecuentemente empleadas en el análisis químico. Para que una sustancia sea activa en el visible debe ser colorida: el que una sustancia tenga color, es debido a que absorbe ciertas frecuencias o longitudes de onda del espectro visible y transmite otras más. Por ejemplo: una solución es amarilla debido a que dentro de la región visible absorbe radiación en el rango de 435 a 480 nm. En este rango de longitud de onda se encuentra el color azul del visible, por lo que este compuesto absorbe el color azul y transmite los colores complementarios que dan origen al color amarillo de la solución mencionada. La absorción y transmisión de las longitudes de onda de la región visible de esta parte del espectro no es la misma en sustancias que den diferentes tonalidades de amarillo, por lo que podemos tener una gama diferente de tonalidades como: amarillo canario, amarillo limón, amarillo pálido, etc. El rango visible se considera de los 380 a los 750 nm. El rango del ultravioleta cercano con cuarzo es de 190 a 380nm [104].

- **Microscopía de barrido electrónico (SEM)**

El Microscopio electrónico de barrido o SEM (Scanning Electron Microscopy), utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen ampliada de la superficie de un objeto. Esta técnica permite la observación y caracterización superficial de sólidos inorgánicos y orgánicos. Tiene una gran profundidad de campo, la cual permite que se enfoque a la vez una gran parte de la muestra.

Las principales utilidades del SEM son la alta resolución (~1 nm), la gran profundidad de campo que le da apariencia tridimensional a las imágenes y la sencilla preparación de las muestras.

Anexo 4: Análisis de correlación

El análisis de correlación se realiza mediante un complemento de Excel [105], en el cual se analiza la fuerza y dirección de la relación lineal entre dos variables continuas. El valor del coeficiente de correlación puede variar de -1 a $+1$. Mientras mayor sea el valor absoluto del coeficiente, más fuerte es la relación entre las variables. Para este análisis, un valor absoluto de 1 indica una relación lineal perfecta. Una correlación cercana a 0 indica que no existe relación lineal entre las variables. Además, el signo del coeficiente indica la dirección de la relación. Si ambas variables aumentan o disminuyen a la vez, el coeficiente es positivo. Si una variable incrementa mientras la otra disminuye, el coeficiente es negativo.

De esta manera, la ecuación usada para el coeficiente de correlación es:

$$Correl(X,Y) = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}}$$

Dónde \bar{x} , \bar{y} son las medias de muestra promedio (matriz 1 y promedio (matriz 2)).

9. Bibliografía

- [1] “La reducción de la pobreza y el hambre: la función fundamental de la financiación de la alimentación, la agricultura y el desarrollo rural.”
<http://www.fao.org/docrep/003/y6265s/y6265s03.htm>.
- [2] G. Acosta Santoyo, “Evaluación de la aplicación de un campo eléctrico para la estimulación de la germinación y desarrollo de plantas con metabolismos C3, C4 Y CAM empleando un arreglo de electrodos 1D Y 2D.” p. 251, 2018.
- [3] T. Okumura, Y. Muramoto, and N. Shimizu, “Acceleration of plant growth by D.C. electric field,” in Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Solid Dielectrics, ICSD 2010, 2010.
- [4] “Maíz.” <https://www.biodiversidad.gob.mx/ usos/maices/maiz.html>.
- [5] Geo, “El suelo,” Estado del medio Ambiente., no. 1984, pp. 120–140, 2004.
- [6] N. C. Brady and R. R. Weil, "The nature and properties of soils". 2017.
- [7] “Introducción a la Geología: El suelo | CivilGeeks.com.”
<https://civilgeeks.com/2016/08/15/introduccion-la-geologia-suelo/>.
- [8] P. Bullock, S. Survey, L. R. Centre, and R. Unido, “Introducción.”
- [9] "Mapa mundial de suelos”, FAO-UNESCO. vol III.
- [10] Semarnat, “La degradación de suelos en México,” Inf. la situación del medio Ambiente. en México. Compend. estadísticas Ambiente. clave y desempeño Ambiente., vol. 23, pp. 119–154, 2017.
- [11] T. V. Sepúlveda and J. V. Trejo, "Tecnologías de remediación para suelos contaminados". 2002.
- [12] “Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).”
- [13] FAO, “Base Referencial Mundial del Recurso Suelo,” Inf. sobre Recur. Mundiales Suelos, vol. 103, p. 117, 2007.
- [14] G. Acosta-Santoyo, R. A. Herrada, S. De Folter, and E. Bustos, “Enhanced Germination and Growth of Arabidopsis thaliana Using IrO₂-Ta₂O₅ | Ti as a Dimensional Stable Anode in the Electro-Culture Technique,” in Geotechnical Special Publication, 2016.
- [15] “La Importancia de la Agricultura en nuestro país.”
<http://www.utn.edu.ec/ficaya/carreras/agropecuaria/?p=1091>.

- [16] E. Hernández Xolocotzi, “La agricultura tradicional en México,” *Comer. Exter.*, vol. 38, no. 8, pp. 673–678, 1988.
- [17] J. Sánchez-Olarte, A. Argumedo-Macías, J. F. Álvarez-Gaxiola, J. A. Méndez-Espinoza, and B. Ortiz-Espejel, “Conocimiento tradicional en prácticas agrícolas en el sistema del cultivo de amaranto en Tochimilco, Puebla,” *Agric. Soc. y Desarro.*, 2015.
- [18] P. y A. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, “Manual teórico-práctico Los Biofertilizantes y su uso en la Agricultura | Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación | Gobierno | gov.mx,” 2015. <https://www.gob.mx/sagarpa/documentos/manual-teorico-practico-los-biofertilizantes-y-su-uso-en-la-agricultura>.
- [19] O. L. Marco Brown and R. E. Reyes Gil, “Tecnologías limpias aplicadas a la agricultura,” *Interciencia*. 2003.
- [20] “Tipos de cultivo, estacionalidad y ciclos | Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación | Gobierno | gov.mx.” <https://www.gob.mx/sagarpa/articulos/tipos-de-cultivo-estacionalidad-y-ciclos/>.
- [21] “El ciclo de cultivo primavera-verano - 2000Agro Revista Industrial del Campo.” <http://www.2000agro.com.mx/sectorrural/ciclo-cultivo-primavera-verano/>.
- [22] “El ciclo de cultivo Primavera/Verano | Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación | Gobierno | gov.mx.” <https://www.gob.mx/sagarpa/articulos/el-ciclo-de-cultivo-primavera-verano?idiom=es>.
- [23] “Cuáles son los 10 principales productos agrícolas de México - Agrichem.” <http://agrichem.mx/cuales-son-los-10-principales-productos-agricolas-de-mexico/>
- [24] “Principales cultivos de México ¿Qué se cultiva en México?” <https://grupomsc.com/blog/agricultura/principales-cultivos-de-mexico>.
- [25] “AGUACATE mexicano planeación agrícola nacional,” 2017.
- [26] https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/200640/Panorama_Agroalime
- [27] “Jitomate.” <https://www.biodiversidad.gob.mx/usos/alimentacion/jitomate.html>.
- [28] A. y P. (Mexico) Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, J. L. Woo Reza, J. Munguía López, A. Román López, M. Á. Segura Castruita, P. Yescas

- Coronado, and E. Frías Ramírez, *Revista mexicana de ciencias agrícolas.*, vol. 3, no. 7. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, 2010.
- [29] “EL CULTIVO DE TRIGO.”
- [30] “Papa, el alimento de México | Revista Infoagro México.”
<https://infoagro.com/mexico/papa-el-alimento-de-mexico/>.
- [31] “Maíz.” <https://www.conacyt.gob.mx/cibiogem/index.php/maiz>.
- [32] “Weblet Importer.”
- [33] “Coleoptilo.” http://www7.uc.cl/sw_educ/cultivos/cereales/maiz/coleopti.htm.
- [34] “Weblet Importer.”
http://www7.uc.cl/sw_educ/cultivos/cereales/maiz/mesocoti.htm.
- [35] “Los Procesos de Germinación y Emergencia en el Cultivo de Maíz | Intagri S.C.” <https://www.intagri.com/articulos/cereales/procesos-de-germinacion-y-emergencia-en-el-cultivo-de-maiz>.
- [36] “Joint meeting of the chemicals committee and the working party on chemicals, pesticides and biotechnology Series on Harmonisation of Regulatory Oversight in Biotechnology, No. 27 Consensus document on the biology of *Zea mays* subsp. *mays* (maize) JT00147699 Document complet disponible sur OLIS dans son format d’origine Complete document available on OLIS in its original format,” 2003.
- [37] “Incrementar tamaño y cantidad de granos en maíz | Yara International.”
<https://www.yara.es/nutricion-vegetal/maiz/increasing-maize-grain-number-and-size/>.
- [38] D. Quiroz and M. Merchan, “Guía para facilitar el aprendizaje en el manejo integrado del cultivo de maíz duro,” *Iniap*, vol. 1, no. 1, p. 126, 2016.
- [39] “La Fenología del Maíz y su Relación con la Incidencia de Plagas | Intagri S.C.”:
<https://www.intagri.com/articulos/fitosanidad/la-fenologia-del-maiz-y-su-relacion-con-la-incidencia-de-plagas>.
- [40] B. J. D. Etchevers, “Useful Techniques of Diagnosis in the Measurement of the Soil Fertility and the Nutrient Status of Crops,” *Terra Latinoam.*, vol. 17 (003), pp. 209–219, 1999.
- [41] “Agroinformación - MAIZ, cultivo y manejo.”
<http://www.abcagro.com/herbaceos/cereales/maiz.asp>.

- [42] I. a. Ciampitti, M. Boxler, and F. O. García, “Nutrición de Maíz: Requerimientos y Absorción de Nutrientes 1,” *Inf. Agronómicas*, vol. 48, pp. 14–18, 1987.
- [43] M. Andrades and E. Martínez, “Fertilidad del suelo y parámetros que la definen,” *Univ. la Rioja-Servicio Publicaciones.*, vol. *Iberus*, no. 3, pp. 16–34, 2014.
- [44] “El desafío”
”http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/Issues_papers_SP/
- [45] K. Anderson, P. Lloyd, and D. Maclaren, “Distortions to agricultural incentives in Australia since World War II,” *Econ. Rec.*, 2007.
- [46] D. Heil and G. Sposito, “Chemical attributes and processes affecting soil quality,” in *Soil quality for crop production and ecosystem health*, E. G. Gregorich and M. R. Carter, Eds. Amsterdam: Elsevier Scientific, 1997, pp. 59–79.
- [47] B. Bailey and M. Lappé, Eds., *Engineering the farm: Ethical and social aspects of agricultural biotechnology*, vol. 16, no. 5. Washington, DC, USA: Island Press, 2003.
- [48] M. Zaman, L. V. Kurepin, W. Catto, and R. P. Pharis, “Enhancing crop yield with the use of N-based fertilizers co-applied with plant hormones or growth regulators,” *J. Sci. Food Agric.*, vol. 95, no. 9, pp. 1777–1785, 2015.
- [49] Y. Yang, S. Ma, Y. Zhao, M. Jing, Y. Xu, and J. Chen, “A Field Experiment on Enhancement of Crop Yield by Rice Straw and Corn Stalk-Derived Biochar in Northern China,” *Sustainability*, vol. 7, no. 10, pp. 13713–13725, 2015.
- [50] R. Lal, “Soil degradation as a reason for inadequate human nutrition,” *Food Secur.*, vol. 1, no. 1, pp. 45–57, 2009.
- [51] O. de las N. U. para la A. y la A. FAO, *El Estado Mundial de la Agricultura y la Alimentación*. 2004.
- [52] “Cyclopedia of American agriculture - L.H. Bailey - Google Books.”
[https://books.google.com.mx/books?id=KykSAwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Cyclopedia+of+American+agriculture:&hl=es419&sa=X&ved=0ahUKEwivueeohc3cAhVD7qwKHUFoCbIQ6AEIJzAA#v=onepage&q=Cyclopedia of American agriculture%3A&f=false](https://books.google.com.mx/books?id=KykSAwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Cyclopedia+of+American+agriculture:&hl=es419&sa=X&ved=0ahUKEwivueeohc3cAhVD7qwKHUFoCbIQ6AEIJzAA#v=onepage&q=Cyclopedia%20of%20American%20agriculture%3A&f=false).

- [53] G. Morar, C. Sîrbu, and I. Oltean, "Effect of the hydroalcoholic extracts from plants on Colorado beetle (*Leptinotarsa decemlineata* Say.). Note II," *ProEnvironment* 2, vol. 2, no. December 2008, pp. 46–49, 2008.
- [54] G. Acosta-Santoyo, R. A. Herrada, S. De Folter, and E. Bustos, "Stimulation of the germination and growth of different plant species using an electric field treatment with IrO₂-Ta₂O₅|Ti electrodes," *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 2018.
- [55] V. H. Blackman and A. T. Legg, "Pot-culture experiments with an electric discharge," *J. Agric. Sci.*, 1924.
- [56] J. H. Priestley, "Light and growth: i. the effect of brief light exposure upon etiolated plants," *New Phytol.*, 1925.
- [57] C. S. Dorchester, "The Effect of electric Current on Certain Crop Plants," 1937.
- [58] J. D. Black, F. R. Forsyth, D. S. Fensom, and R. B. Ross, "Electrical stimulation and its effects on growth and ion accumulation in tomato plants," *Can. J. Bot.*, 1971.
- [59] H. A. Pohl and G. W. Todd, "Electroculture for crop enhancement by air anions," *Int. J. Biometeorol.*, 1981.
- [60] J. Y. Yi, J. W. Choi, B. Y. Jeon, I. L. Jung, and D. H. Park, "Effects of a low-voltage electric pulse charged to culture soil on plant growth and variations of the bacterial community," *Agric. Sci.*, vol. 3, no. 3, pp. 339–346, 2012.
- [61] A. G. Volkov, *Plant electrophysiology: Signaling and responses*. 2012.
- [62] A. Aladjadjian, "Physical Factors for Plant Growth Stimulation Improve Food Quality," *Food Prod. - Approaches, Challenges Tasks*, 2012.
- [63] Rosa Alhelí Herrada García, "Síntesis y caracterización de electrodos de titanio modificados a base de IrO₂ y Ta₂O₅ construidos por depósito electroquímico para la generación de radicales hidroxilo," 2018.
- [64] I. Q. R. Alhelí and H. García, "Construcción y evaluación de electrodos modificados de IrO₂-Ta₂O₅|Ti para la degradación electroquímica de hidrocarburos' Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, 2015.
- [65] R. C. Alkire, D. M. Kolb, J. Lipkowski, and P. N. Ross, "Chemically modified electrodes," *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*. 2009.

- [66] L. Besra and M. Liu, “A review on fundamentals and applications of electrophoretic deposition (EPD),” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 52, no. 1, pp. 1–61, 2007.
- [67] “Home.” <http://www.electrophoretic-deposition.com/>.
- [68] J. Antonio, “Tratamiento electro-hidroponico de maiz y su influencia en la cinemática de crecimiento,” vol. 1, pp. 221–247, 1985.
- [69] Z. Yan, G. Li, J. Wang, Z. Zhang, Z. Feng, M. Tang, and R. Zhang, “Electrocatalytic study of IrO₂-Ta₂O coated anodes with pretreated titanium substrates,” *J. Alloys Compd.*, vol. 680, no. 36, pp. 60–66, 2016.
- [70] R. A. Herrada, A. Medel, F. Manríquez, I. Sirés, and E. Bustos, “Preparation of IrO₂-Ta₂O₅|Ti electrodes by immersion, painting and electrophoretic deposition for the electrochemical removal of hydrocarbons from water,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 319, pp. 102–110, 2016.
- [71] J. M. Thomas, “Turning Points in Catalysis,” *Angewandte Chemie International Edition in English*. 1994.
- [72] J. Rossmeisl, Z. W. Qu, H. Zhu, G. J. Kroes, and J. K. Nørskov, “Electrolysis of water on oxide surfaces,” *J. Electroanal. Chem.*, vol. 607, no. 1–2, pp. 83–89, 2007.
- [73] M. Yousefpour and A. shokuhy, “Electrodeposition of TiO₂-RuO₂-IrO₂ coating on titanium substrate,” *Superlattices Microstruct.*, 2012.
- [74] R. A. Herrada, A. Medel, F. Manríquez, I. Sirís, and E. Bustos, “Preparation of IrO₂-Ta₂O₅|Ti electrodes by immersion, painting and electrophoretic deposition for the electrochemical removal of hydrocarbons from water,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 319, pp. 102–110, 2016.
- [75] Q. Xiang, J. Yu, and P. K. Wong, “Quantitative characterization of hydroxyl radicals produced by various photocatalysts,” *J. Colloid Interface Sci.*, 2011.
- [76] J. Cheng, H. Zhang, G. Chen, and Y. Zhang, “Study of Ir_xRu_{1-x}O₂ oxides as anodic electrocatalysts for solid polymer electrolyte water electrolysis,” *Electrochim. Acta*, vol. 54, no. 26, pp. 6250–6256, 2009.
- [77] S. Trasatti, “Electrocatalysis in the anodic evolution of oxygen and chlorine,” *Electrochim. Acta*, vol. 29, no. 11, pp. 1503–1512, Nov. 1984.
- [78] M. Yousefpour and T. Park, “substrate,” vol. 51, no. 6, pp. 842–853, 2012.

- [79] C. Sicard-Roselli, E. Brun, M. Gilles, G. Baldacchino, C. Kelsey, H. McQuaid, C. Polin, N. Wardlow, and F. Currell, “A new mechanism for hydroxyl radical production in irradiated nanoparticle solutions,” *Small*, 2014.
- [80] H. Czili and A. Horva, “Aplicabilidad de cumarina para detectar y medir los radicales hidroxilo generada por la fotoexcitación de TiO₂ nanopartículas,” vol. 81, pp. 295–302, 2008.
- [81] G. D. V. Silvestre, V. Silvestre, and G. Federal, “NORMA Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.” *Secr. Medio Ambient. y Recur. Nat.*, 2002.
- [82] SEMARNAT, “NOM-021-SEMARNAT-2000,” *D. Of. la Nación*, 2002.
- [83] H. Sorption, E. Techniques, A. C. Modified, and M. Milling, “Molienda Mecánica Evaluation of Hydrogen Sorption by Electrochemical Techniques on Activated Coal Modified with Ni for Mechanical Milling,” no. 36, pp. 251–254, 2007.
- [84] S. Renew, E. Heyno, P. Schopfer, and A. Liskay, “Sensitive detection and localization of hydroxyl radical production in cucumber roots and Arabidopsis seedlings by spin trapping electron paramagnetic resonance spectroscopy,” *Plant J.*, vol. 44, no. 2, pp. 342–347, 2005.
- [85] C. Comninellis and G. P. Vercesi, “Characterization of DSA-Type electrodes : choice of a coating,” *J. Appl. Electrochem.*, vol. 21, pp. 335–345, 1991.
- [86] R. A. Rodríguez-Fuentes. H., “Métodos de análisis de suelos y plantas: criterios de interpretación,” *Trillas México, D. F.*, no. 2, p. 239, 2011.
- [87] L. A. Barbaro, M. A. Karlanian, and D. A. Mata, “Importancia del pH y la Conductividad Eléctrica en los sustratos para plantas,” *Minist. Agric. Ganad. y Pesca*, 2005.
- [88] S. Kant and U. Kafkafi, “ Absorción de potasio por los cultivos en distintos estadios fisiológicos,” in *International Potash Institute (IPI)*, 2002.
- [89] Sagarpa, “Mayor rendimiento del maíz fertilizándolo con potasio, en la fraileasca, chiapas,” no. 22, 2016.
- [90] M. Pérez-Corona, A. Corona, D. Beltrán, J. Cárdenas, and E. Bustos, “Evaluation of IrO₂-Ta₂O₅/Ti electrodes employed during the electroremediation

- of hydrocarbon-contaminated soil,” *Sustain. Environ. Res*, vol. 23, no. 4, pp. 279–284, 2013.
- [91] institucional Profertil, “Nutrientes Absorbidos por Plantas que Producen 11. 3 ton / ha de Maíz,” pp. 3–5.
- [92] R. Ruiz, R. Ferreyra, and C. Barrera, “Manejo del suelo y nutrición en suelos con problemas de aireación,” *Semin. Int. Manejo del riego y suelo en el Cultiv. del palto*, no. 562, pp. 93–106, 2007.
- [93] C. Comninellis and G. Chen, *Electrochemistry for the environment*. 2010.
- [94] F. O. García, “Fertilización de Maíz en la Región Pampeana,” 1996.
- [95] “Macro y micronutrientes en el cultivo - Fumanchu | El Blog.”: <http://fumanchu.info/macro-micronutrientes-cultivo/>.
- [96] “Ficha técnica: Deficiencia y exceso de nutrientes esenciales en el suelo - PortalFruticola.com.” <http://www.portalfruticola.com/noticias/2018/05/14/ficha-tecnica-deficiencia-y-exceso-de-nutrientes-esenciales-en-el-suelo/>.
- [97] “La Capacidad de Intercambio Catiónico.” <https://www.smart-fertilizer.com/es/articulos/Cation-Exchange-Capacity>.
- [98] N. Rodríguez S., E. Ruz J., and J. Chavarría R., “Detección y corrección de la acidez de los suelos,” *Investig. y Prog. Agropecu. Quilamapu*, vol. 57, no. 3, pp. 26–30, 1993.
- [99] K. T. Osman, *Soils: Principles, properties and management*, vol. 9789400756. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013.
- [100] Baudilio Juscafresa, *árboles frutales. cultivo y explotación comercial*, Segunda. Barcelona, 1986.
- [101] S. Trasatti and O. A. Petrii, “Real surface area measurements in electrochemistry,” *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 1992.
- [102] L. K. Xu and J. D. Scantlebury, “Electrochemical surface characterization of IrO₂-Ta₂O₅ coated titanium electrodes in Na₂SO₄ solution,” *J. Electrochem. Soc.*, 2003.
- [103] L. K. Xu and J. D. Scantlebury, “A study on the deactivation of an IrO₂-Ta₂O₅ coated titanium anode,” *Corros. Sci.*, 2003.
- [104] D. SKOOG, J. Leary, and F. Holler, “Espectrometría Visible Y Ultravioleta.,” *Principios Análisis Instrum.*, 1998.
- [105] P. F. C. Ávila, “Formulación para Matriz de Correlación y Covarianza,” 2012.