



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA

**Análisis de propiedades fisicoquímicas del agua
activada por plasma y su aplicación en la agricultura**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA

JOCELYN CELESTINO VÁZQUEZ

DIRECTOR

DR. CÉSAR TORRES SEGUNDO

CODIRECTOR

DR. ESTEBAN MONTIEL PALACIOS

AGRADECIMIENTOS

Con cariño y mi entera gratitud quiero dar gracias a mi madre y a mi padre, por su inmenso amor y apoyo incondicional que me han brindado a lo largo de toda mi vida, por ser el pilar fundamental que ha motivado mi formación académica, por impulsarme a lograr mis sueños y anhelos.

A mis hermanos, familia y amigos en general que han estado presentes en esta importante etapa de mi vida.

A mi hermosa perrita Bonnie, mi compañera fiel siempre en todas esas noches de desvelos durante la carrera.

A ti Leo, agradezco poder tenerte en mi vida, gracias por tu infinito apoyo, por tu amor y por tu motivación en cada momento.

Expreso mi profundo agradecimiento a mi director de tesis el Dr. César Torres Segundo por su paciencia, confianza, acompañamiento, y asesoramiento, durante el desarrollo de esta investigación.

De igual manera agradecer el apoyo recibido por parte del Dr. Esteban Montiel Palacios como codirector en esta tesis.

A la Dra. Yessica Flor Cervantes Adame por su ayuda, y su orientación brindada en este proyecto.

A mis revisores de tesis la Dra. María del Carmen Fuentes Albarrán, al Dr. Fidel Benjamín Alarcón Hernández y al Dr. José Luis Gadea Pacheco por sus comentarios, disposición y observaciones muy acertadas que ayudaron a enriquecer esta tesis.

Finalmente, a la Escuela de Estudios Superiores de Xalostoc por permitirme hacer uso de las instalaciones para el desarrollo de la experimentación.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE TABLAS	6
LISTA DE ABREVIATURAS	7
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	
1.1. Descripción del problema	9
1.2. Justificación	10
1.3. Objetivo general	10
1.3.1. Objetivos específicos	10
1.4. Hipótesis	10
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	
2.1. Plasma	11
2.1.1. Historia de las investigaciones del plasma	12
2.1.2. Características del plasma	14
2.1.3. Fundamentos del plasma y su clasificación	15
2.1.4. Plasma en la vida cotidiana	15
2.2. Agua	17
2.2.1. Propiedades fisicoquímicas del agua	18
2.3. Agua activada por plasma	20
2.3.1. El AAP en la descontaminación microbiológica de los alimentos	22
2.3.2. Descontaminación de equipos y superficies	23
2.3.3. El AAP como agente de curado en productos cárnicos	24
2.3.4. El agua activada por plasma en la inactivación de microorganismos	24
2.3.5. Descontaminación de semillas	25
2.3.6. El AAP en la producción de germinados	25
2.3.7. AAP como técnica de degradación de pesticidas	26
2.3.8. El AAP como agente coadyuvante en la modificación de la estructura del almidón	26
2.4. Propiedades fisicoquímicas de AAP	27
2.4.1 pH	27
2.4.2. Conductividad eléctrica	28

2.4.3. Producción de peróxido de hidrógeno	28
2.4.4. Nitritos NO ₂ – y Nitratos NO ₃ – concentración de iones	28
2.4.5. Salinidad	31
2.4.6. Total de sólidos disueltos	31
2.5. Sistema de tratamiento	31
2.5.1. Reactor de plasma	32
2.6. Agua activada por plasma y su aplicación en la agricultura	33

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1. Material y equipo	34
3.2. Medición de propiedades fisicoquímicas del agua activada por plasma	37
3.2.1. Procedimiento para la determinación de nitrito TNT 839 HACH	38
3.2.2. Procedimiento para la determinación de nitrato TNT 835 HACH	39
3.2.3. Procedimiento para determinación de peróxido de hidrógeno con kit de prueba HACH MODELO HYP-1 Cat. No. 2291700-LM.	39
3.2.4. Procedimiento siembra de frijol ayocote	40

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Gráficas de variables medidas	42
4.2. Comparación de tratamientos en la siembra de frijol ayocote regado con AAP	51

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones	56
5.2. Recomendaciones	57

CAPÍTULO VI. LITERATURA CITADA	58
---------------------------------------	-----------

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estados de la materia	11
Figura 2. Ilustración de plasma como estado de la materia	11
Figura 3. Fotografía de Irving Langmuir	13
Figura 4. Estructura Molecular del estado plasmático	14
Figura 5. Imagen del Sol	16
Figura 6. Lámparas fluorescentes	16
Figura 7. Esterilización de material médico	17
Figura 8. Representación del agua	18
Figura 9. Estructura tetraédrica del agua de 105°	19
Figura 10. Puentes de hidrógeno entre moléculas del agua	19
Figura 11. Imagen de plasma Atmosférico no térmico	21
Figura 12. Mecanismos de inactivación bacteriana del agua activada por plasma en el aspecto oxidativo y físico	30
Figura 13. Diagrama de las partes del reactor de plasma a presión atmosférica	32
Figura 14. Semilla de frijol ayocote morado	33
Figura 15. Sistema de tratamiento utilizado	37
Figura 16. Imagen del plasma activando el agua	38
Figura 17. Medición de variables con multiparámetro HACH	38
Figura 18. Selección de las semillas de frijol ayocote	40
Figura 19. Colocación del sustrato Cosmopeat en la charola de germinación	40
Figura 20. Mapa del estado de Morelos Aumento de la temperatura en AAP	41
Figura 21. Aumento de la temperatura en AAP	42
Figura 22. Valores de pH de AAP donde se observa una tendencia descendiente	43
Figura 23. Valores de C.E. de AAP con tendencia ascendente	44
Figura 24. Valores de TDS en AAP de Apatlaco	45
Figura 25. Valores de salinidad en AAP de Apatlaco	45
Figura 26. Concentración de nitritos en AAP de Apatlaco determinados por el método HACH	48
Figura 27. Gráfica de valores de nitritos en AAP de Apatlaco	48
Figura 28. Gráfica de valores de nitratos en AAP de Apatlaco	49
Figura 29. Concentración de nitratos en AAP de Apatlaco determinados por el método HACH	49
Figura 30. Gráfica de valores de peróxido de hidrógeno en AAP de Apatlaco	50
Figura 31. Momento exacto en que la muestra cambio de color al momento de realizar una de las pruebas de H ₂ O ₂	50
Figura 32. Semillas de frijol ayocote que se sembraron en la charola de germinación	51
Figura 33. Comienzo de la germinación del frijol ayocote	51
Figura 34. Plantas de frijol ayocote al sexto día de sembradas	52
Figura 35. Gráfica del número de semillas germinadas a un día de empezar la germinación	52
Figura 36. Comparación de crecimiento de frijol ayocote al séptimo día	53
Figura 37. Comparación de crecimiento de frijol ayocote al noveno día de siembra	53
Figura 38. Gráfica del número de plántulas al cuarto día de haber germinado	54
Figura 39. Comparación de crecimiento del frijol ayocote al doceavo día de siembra	54

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Reactivos utilizados en la parte experimental	34
Tabla 2. Material usado en las pruebas agrícolas	35
Tabla 3. Equipo utilizado en la caracterización del Agua Activada por Plasma.	35
Tabla 4. Funciones y fotografía de cada uno de los equipos utilizados en la parte experimental.	36
Tabla 5. Parámetros fisicoquímicos obtenidos del agua de casa del poblado de Apatlaco	46
Tabla 6. Propiedades fisicoquímicas obtenidas del agua de casa del poblado de Apatlaco	47
Tabla 7. Parámetros fisicoquímicos obtenidos del agua de laboratorio de la EESX	55

LISTA DE ABREVIATURAS

AAP	Agua activada por plasma
C.E.	Conductividad Eléctrica
ONUAA	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
PANT	Plasma atmosférico no térmico
RNS	Especies reactivas de nitrógeno
ROS	Especies reactivas de oxígeno
TDS	Total de sólidos disueltos
UV	Ultravioleta

1. INTRODUCCIÓN

El plasma es el cuarto estado de la materia, el cual está compuesto por iones positivos y negativos, electrones, átomos excitados y neutros, radicales libres, moléculas, estados excitados y fotones UV. El 99.9% del cosmos es plasma. Es parecido al estado gaseoso, pero en el cual una definida cantidad de sus partículas permanecen cargadas eléctricamente (ionizadas) y no tienen equilibrio electromagnético. Se subdivide en plasma térmico y no térmico. El agua activada por plasma es el producto formado cuando el agua se expone al plasma atmosférico no térmico. Se puede obtener desde distintas fuentes de generación de plasma no térmico que aplican diversos tipos de descarga eléctrica. Tiene un gran potencial para su aplicación en la industria alimentaria para mejorar la calidad microbiológica de los alimentos, descontaminar zonas de contacto, conservación de productos cárnicos, estimular la germinación de semillas, degradar pesticidas, cambiar la composición del almidón, así como también tratamientos que pueden ser utilizados en muchas áreas de aplicación, por ejemplo, en medicina, odontología, ingesta de alimentos, agricultura, ambiente, etc. El presente trabajo de investigación se centra en el análisis de propiedades fisicoquímicas del agua activada por plasma, tales como pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, concentración de nitritos, nitratos, salinidad, peróxido de hidrógeno y temperatura, para poder observar su variación en función del tiempo de activación o interacción con el plasma y su posible uso en la germinación de semillas de interés agrícola. Este trabajo se realizó en las instalaciones de la EESX.

1.1. Descripción del problema

Para el año 2050, se estima que la población de la Tierra alcanzará los 10 mil millones aproximadamente, lo que apunta la necesidad de enfoques innovadores para la producción y procesamiento de alimentos para satisfacer la demanda mundial de ingesta nutricional (Thirumdas et al., 2018). Además, el crecimiento demográfico y el desarrollo socioeconómico están propiciando la escasez del agua en diferentes partes del mundo. Y como es bien sabido la agricultura constituye el mayor consumidor de agua, absorbiendo más del 70% de las extracciones mundiales, por lo que, el uso de esta innovadora tecnología podría lograr un uso más eficiente, equitativo, y sostenible del agua en este sector. De acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, más de 600 millones de personas enferman y mueren 420,000 cada año como resultado de comer alimentos contaminados con bacterias, virus, parásitos, toxinas y productos químicos altamente nocivos para la salud humana que pudiesen quedar sobre los alimentos después de que se aplican a los cultivos alimentarios. Otra amenaza para la salud de las plantas son las plagas, esto ha generado un mercado global de plaguicidas y pesticidas que ha aumentado constantemente, pudiendo ser el remedio peor que la enfermedad, debido a que el uso indiscriminado de pesticidas tiene impactos tanto para la salud del humano, como para el ambiente. Los residuos de plaguicidas ponen en peligro la seguridad alimentaria y el comercio internacional de alimentos. El uso generalizado de estos productos químicos da como resultado, la contaminación de los suelos agrícolas, los recursos de agua dulce, humedales, ecosistemas y vegetación marina. Su uso inapropiado reduce la biodiversidad. Un manejo sostenible de plagas y pesticidas es crucial para la sanidad vegetal es por eso que se busca recurrir a nuevas tecnologías como el agua activada por plasma para la inactivación bacteriana y control eficiente de patógenos en crecimiento, como una alternativa a los métodos tradicionales de desinfección, además de que puede representar una alternativa a los fertilizantes químicos en la agricultura.

1.2. Justificación

El presente proyecto tiene como finalidad el estudio del análisis fisicoquímico del agua activada por plasma, y su posible aplicación en un sector de suma importancia, la agricultura. De acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, es necesario aumentar la producción de alimentos inocuos para cubrir las necesidades de la población mundial que ha ido incrementando drásticamente (ONUAA, 2021). En donde es de suma importancia aplicar tecnologías innovadoras que jueguen un papel importante para nuestra supervivencia. Este trabajo de investigación permitirá mostrar los beneficios y ejemplos de aplicaciones que tiene esta tecnología, asimismo, se plantea la necesidad de profundizar aún más en este tema, debido a que la información en nuestro país es aún muy escasa, y poco profunda, siendo una tecnología con mucho potencial que puede ser explotada y aplicada en diversos sectores de interés.

1.3. Objetivo general

- Medir y caracterizar las propiedades fisicoquímicas del agua activada por plasma.

1.3.1. Objetivos específicos

- Comparar los resultados de las propiedades medidas del agua activada por plasma con relación al tiempo de exposición.
- Sembrar semillas de frijol ayocote morado y regarlas con agua activada por plasma.
- Comparar el crecimiento del frijol ayocote irrigado con AAP, contra el testigo.
- Comprobar la eficacia del AAP en la agricultura.

1.4. Hipótesis

- El valor del pH decrece mientras que el de la conductividad eléctrica aumenta conforme el tiempo de exposición incrementa.
- Las semillas regadas con agua activada por plasma germinarán en menor tiempo, el crecimiento y características físicas de las plantas serán mejor que el de las muestras testigo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Plasma

Es el cuarto estado fundamental de la materia después del sólido, líquido y gas (figura 1), es un medio conductor de electricidad, rico en iones positivos y negativos libres, reactivos radicales, radiación electromagnética y fuertes campos eléctricos.



Figura 1. Estados de la materia tomado de:
<https://www.significados.com/estados-de-la-materia/>

El plasma (figura 2) es una mezcla de partículas cargadas eléctricamente en la que la carga negativa total de las partículas es igual a la carga positiva sumaria.

De modo que, el plasma es un medio eléctricamente neutro que conduce la corriente eléctrica a la perfección (Milántiev y Temkó, 1983)



Figura 2. Ilustración de plasma como estado de la materia, tomado de:
<https://www.istockphoto.com/es/fotos/plasma-materia>

2.1.1. Historia de las investigaciones del plasma

El origen de las investigaciones del plasma se sitúa a mediados del siglo XVIII. En 1769, Benjamín Franklin 'domesticó' el rayo, y el Gran Duque de Toscana ordenó poner pararrayos sobre los almacenes de pólvora del ducado, entonces, la atención hacia la electricidad tomó relevancia. El desarrollo de los elementos galvánicos por parte de Volta resultó en el descubrimiento del arco eléctrico a principios del siglo XIX. En 1808, Humphry Davy desarrolló la descarga de arco eléctrico en estado estable usando corriente directa. En la segunda mitad del siglo XIX, la electricidad en forma de arco eléctrico se utilizó en aplicaciones prácticas completamente nuevas (García, 2009).

El desarrollo de aplicaciones tecnológicas de las cargas de arco eléctrico estuvo acompañado a mediados del siglo XIX, por los fundamentos de la física del plasma. Esto se asoció con las propiedades eléctricas de los materiales, inicialmente en la forma de las leyes de electrólisis de Faraday (1830) y posteriormente influyendo en flujos de partículas (en el cátodo y haces de canal) magnéticos y campos eléctricos en tubos de descarga eléctrica con baja presión de gas.

Estas son descargas detectadas por primera vez por Michael Faraday y posteriormente por Geisler en muchas variantes (década de 1850), pero las investigaciones de los "rayos catódicos" comenzó en la década de 1870. En particular, William Crookes al experimentar con descargas eléctricas en gases, se dio cuenta de que el gas en donde se establecía la descarga se comportaba de manera diferente que un gas regular demostrando que presentan flujos de partículas.

El conocimiento de algunas propiedades poco comunes de los gases, particularmente de sus propiedades eléctricas, llevó a Crookes en 1879 a sugerir que se podría considerar un cuarto estado de la materia, el estudio de las descargas eléctricas en los gases y la observación de los astros motivaron investigaciones posteriores con gases altamente ionizados.

El rápido crecimiento e intensa investigación desarrollada han llevado a la tecnología de plasma a ocupar un lugar importante en el campo científico actual (Pacheco, 2009).

Irving Langmuir (figura 3) fue un ingeniero, químico y físico estadounidense, galardonado con el premio Nobel de Química en 1932, distinguido por los descubrimientos científicos que

realizó en su época, también por las muchas aplicaciones prácticas muy importantes que se hicieron de su trabajo. Su productividad científica fue prodigiosa, debido a que publicó alrededor de cinco artículos científicos al año durante todo el período de su carrera investigadora, un grupo resultante de más de 200 artículos en donde incluyó una gran diversidad de temas, por ejemplo: las leyes de convección y conducción del calor en los gases (1912), el efecto de la carga espacial y los gases residuales o corrientes termoiónicas en alto vacío (1913), reacciones químicas en superficies (1921), etc.

En 1930, Irving Langmuir dió nombre a los gases ionizados existentes en el universo, con el término “plasma” que proviene de la palabra griega que significa “moldeable”. Después, en 1936, el físico soviético Lev Landáu elabora y establece la teoría estadística que describe el comportamiento de los plasmas (Bravo, 2001). Asimismo, en 1942, Hannes Alfvén desarrolló las ecuaciones que describen el movimiento de un fluido eléctrico en presencia de campos magnéticos. El movimiento colectivo de los electrones en los metales fue abordado por primera vez por los físicos estadounidenses David Bohm y David Pines en 1952, y fue ahí donde se apreció plenamente la aplicabilidad general del concepto de plasma (Ramírez, 2020).



Figura 3. Fotografía de Irving Langmuir
tomada de: <https://www.britannica.com/biography/Irving-Langmuir>

2.1.2. Características del plasma

En un gas cualquiera como el aire, el movimiento de las moléculas es dominado por colisiones o fuerzas externas, esto se debe a que la fuerza gravitacional es mínima y los campos electromagnéticos no tienen relevancia al tratarse de moléculas neutras, mientras que, en un plasma, la situación es completamente diferente, puesto que incluye partículas cargadas (electrones e iones), los cuales son susceptibles a campos electromagnéticos. Conforme estas partículas se mueven existe la posibilidad de que se produzcan concentraciones de carga positiva o negativa, conllevando a la generación de campos eléctricos dentro del plasma. Las cargas en movimiento significan corrientes eléctricas lo cual, a su vez, significa campos magnéticos.

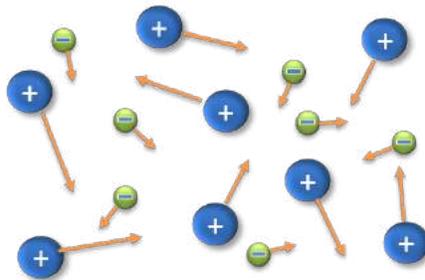


Figura 4. Estructura Molecular del estado plasmático,

tomada de <https://www.quimicas.net/2015/07/estado-plasmatico-de-la-materia.html>

El plasma es casi neutro eléctricamente debido a la alta movilidad de los electrones liberados y excitados, cualquier concentración de carga positiva que diera lugar a un campo eléctrico será anulada por una avalancha electrónica de forma básicamente inmediata justificando de esta forma la “neutralidad”, no obstante, dependiendo tanto de la densidad como de la temperatura de un plasma en especial, existirán en él zonas en las cuales habrán concentraciones de carga y, por consiguiente, campos eléctricos; la medida de dichas zonas idealizadas como esferas está dado por el radio de Debye, llamado además longitud de Debye, que puede variar a partir de unas centenas de nanómetros en el núcleo del Sol hasta una decena de kilómetros en el medio intergaláctico (Guadamuz, 2013). Se puede mencionar, entonces, que, si las magnitudes totales de nuestro cúmulo de gas ionizado son mucho más grandes a un radio de Debye, se cumple con la condición de cuasineutralidad.

2.1.3. Fundamentos del plasma y su clasificación

Habitualmente se hallan tres estados de la materia los cuales son: sólido, líquido y gas. Cuando un sólido se calienta se transforma en un líquido y después de un líquido a un gas. Al aplicar suficiente energía a un gas, se convierte en un gas ionizado conocido como plasma (Nandkumar, 2014).

El plasma tiene especies químicas reactivas como electrones, iones, moléculas neutras y átomos, así como especies cargadas, además, la emisión de radiación se genera en el ultravioleta, así como zonas visibles e infrarrojas cercanas a lo largo de la generación de plasma (Fridman, 2012).

Su clasificación se basa en función de su equilibrio térmico, es decir, dependiendo de si la temperatura de las partículas que lo forman es o no la misma para cada tipo de partícula. Se dividen en plasma térmico y plasma no térmico (Yan et al., 2017). El primer tipo de plasma tiene electrones a temperaturas similares a las de las especies más pesadas, por ejemplo, son plasmas térmicos los del interior de las estrellas, los plasmas producidos en el núcleo de los dispositivos de fusión nuclear, así como los plasmas de arco, mientras que, el plasma no térmico se caracteriza por una temperatura de los electrones más alta que la de las otras especies activas presentes en la masa del plasma (Bazaka et al., 2011).

Los plasmas fríos generados en condiciones atmosféricas son de particular interés, debido a que pueden generarse con fuentes de plasma simples, incluidas descargas de corona, descargas luminiscentes, descargas de barrera dieléctrica y chorros de plasma.

2.1.4. Plasma en la vida cotidiana

El cuarto estado de la materia juega un papel cotidiano en nuestras vidas, tanto el producido naturalmente como el generado artificialmente.

A continuación, se describen algunos ejemplos tales como, los relámpagos, al producirse una diferencia de potencial eléctrico suficientemente alto entre las nubes y el suelo, un trayecto a través del aire se ioniza y se forma un canal de plasma. En la ionosfera, cuando en las partes altas de la atmósfera terrestre la radiación solar en forma de rayos ultravioleta es lo suficientemente energética como para ionizar las moléculas de aire; a dichas alturas la atmósfera es tan rala que los electrones liberados pueden existir por cortos períodos de

tiempo antes de recombinarse con los iones. En los televisores o monitores con pantalla de plasma, en las lámparas domésticas, en el Sol (figura 5), en las auroras boreales y recientemente, aunque de manera indirecta se ha utilizado en la manufactura de circuitos integrados, proceso conocido como “etching”.

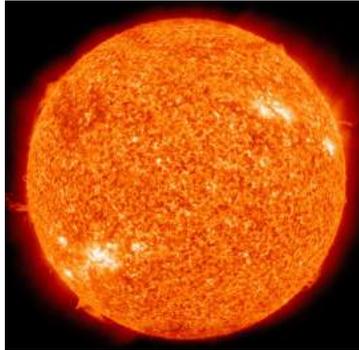


Figura 5. Imagen del Sol, tomado de Wikimages en Pixabay

Otro ejemplo serían las lámparas fluorescentes (figura 6), las cuales están formadas por un tubo que contiene mercurio y un gas inerte (argón) a una presión inferior a la presión atmosférica. El gas ionizado excita los átomos de mercurio, como consecuencia, emiten luz visible y ultravioleta. El tubo se reviste con un recubrimiento que contiene fósforo, dado que éste emite luz cuando recibe radiación ultravioleta. Los letreros de neón y las luces de mercurio de las calles y avenidas funcionan por un principio similar. La luz es la parte del espectro electromagnético que se conoce como visible porque es la que detecta el ojo humano y está en el intervalo entre los 380 y 780 nm.



Figura 6. Lámparas fluorescentes, tomada de Istock

En medicina, la tecnología de plasma también se ha considerado para la desinfección y esterilización de equipos médicos (figura 7). La esterilización con plasma puede ser adecuada para implantes y dispositivos médicos sensibles a la temperatura, la radiación y los productos químicos. Otra aplicación importante es aumentar la biocompatibilidad de los biomateriales que se utilizan para implantes que estén en contacto con la sangre, como, por ejemplo, válvulas y catéteres para cirugías cardiovasculares; prótesis para implantes ortopédicos, etc. Un biomaterial es un material diseñado para ser implantado o incorporado dentro de nuestro cuerpo para que reemplace o restaure alguna función de nuestro organismo o incluso alguna parte de este. Para ello, es importante que el material sea biocompatible, es decir, que interactúe de manera favorable con nuestro organismo, sin que éste lo rechace.



Figura 7. Esterilización de material médico con plasma
tomada de <https://www.astp.com/plasma-applications>

2.2. Agua

El agua (figura 8) es un elemento vital de la naturaleza, el cual, ha estado presente en la Tierra desde hace unos tres mil millones de años. Considerada como el líquido de la vida. Constituye también la biomolécula más abundante y más ampliamente distribuida.

En estado sólido, hielo o nieve, cubre las regiones más frías de nuestro planeta. En forma líquida cubre las tres cuartas partes de la superficie terrestre. Y en el aire está en forma de vapor.

La molécula del agua está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, cada átomo de hidrógeno está unido al de oxígeno por un enlace covalente que, en este caso, se forma porque los dos átomos comparten un par de electrones. Este par está constituido por el electrón solitario que tiene el átomo de hidrógeno en su única órbita y uno de los seis que

tiene el oxígeno en la órbita más periférica, de esta manera, cada átomo de hidrógeno queda con dos electrones y el del oxígeno con ocho.

El agua es una sustancia de suma importancia para la vida con excepcionales propiedades debidas a su composición y estructura. Es una molécula simple, con enlaces polares los cuales permiten que se formen puentes de hidrógeno entre moléculas adyacentes. Este enlace tiene una gran importancia debido a que atribuye propiedades al agua que corresponden a una mayor masa molecular. Por tanto, sus puntos de fusión y ebullición son elevados, necesarios para que el agua sea líquida a la temperatura de la Tierra.



*Figura 8. Representación del agua.
(Tomado de PublicDomainPictures en Pixabay)*

2.2.1. Propiedades fisicoquímicas del agua

Presenta una distribución irregular de la densidad electrónica, el oxígeno atrae hacia sí los electrones de ambos enlaces covalentes, por lo tanto, la mayor densidad electrónica (carga negativa) es concentrada alrededor del átomo de oxígeno y cerca de los hidrógenos la menor (carga positiva). La molécula tiene una geometría angular debido a que los dos átomos de hidrógeno forman un ángulo de unos 105° , como se muestra en la figura 9, lo que hace de ella una molécula polar posible de unirse con otras sustancias polares (Carvajal, 2012).

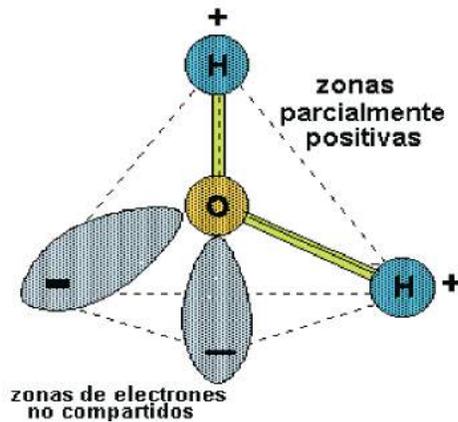


Figura 9. Estructura tetraédrica del agua de 105° (Carvajal, 2012).

La atracción electrostática entre la carga parcial positiva cercana a los átomos de hidrógeno de una molécula de agua y la carga parcial negativa cercana al oxígeno de otra permite la unión de moléculas de agua vecinas mediante un enlace químico con suma importancia para la vida, que explica sus propiedades físicas y químicas: el puente de hidrógeno, como se puede observar en la figura 10.

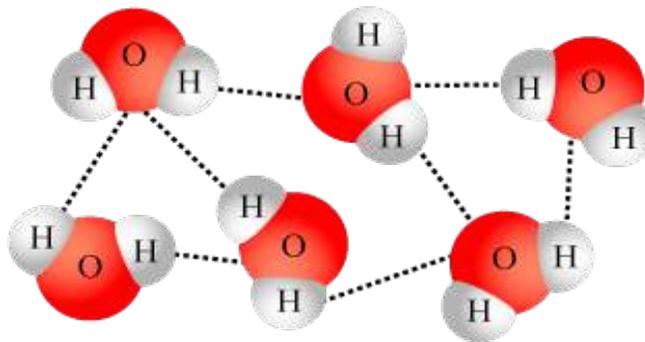


Figura 10. Puentes de hidrógeno entre moléculas del agua (Burns, 2013).

En un puente de hidrógeno, al átomo electronegativo unido de forma covalente al hidrógeno se le conoce como el “átomo donador”; al otro átomo electronegativo se le conoce como “aceptor” del puente de hidrógeno. El átomo de hidrógeno de una de las moléculas es atraído por el oxígeno de la otra molécula de agua, sirviendo, así como un intermediario o puente para la interacción entre los dos oxígenos (Peón, 2007). Su geometría angular permite que el hidrógeno haga de puente entre los dos átomos electronegativos (Martínez, 2007).

El agua posee una gran cohesividad intermolecular, condicionando su alto punto ebullición, de fusión y elevado calor específico. Romper los puentes de hidrógeno, requiere mucha energía y por ello el agua tiene un punto de ebullición tan alto.

El carácter transitorio de los puentes de hidrógeno, que se están formando y rompiendo continuamente, permite el movimiento molecular, y contribuye a que el agua se presente en estado líquido a temperatura ambiente (Ball, 2008). Asimismo, son de suma importancia para la vida pues no sólo atribuyen una resistencia estructural al agua sino también a otras muchas moléculas. Por ejemplo, en la estructura del ADN, uniendo las bases nitrogenadas y, en las proteínas, permiten los cambios reversibles que hacen posible sus funciones (Brenes y Rojas, 2005).

2.3. Agua activada por plasma (AAP)

El agua puede ser “activada” al aplicar plasma en contacto directo con agua durante un tiempo de exposición dado. Contiene peróxido de hidrógeno, nitritos y nitratos en donde el peróxido de nitrito se forma mediante una reacción entre el nitrito y el peróxido de hidrógeno en un ambiente ácido (Lukes et al., 2008). Al contener esta gran diversidad de especies químicas, el AAP presenta un gran potencial para su aplicación en la industria alimentaria para mejorar la calidad microbiológica de los alimentos, descontaminar superficies de contacto, conseguir los atributos característicos de los productos cárnicos curados sin la necesidad de adicionar nitritos, estimular la germinación de semillas, degradar pesticidas y modificar la estructura del almidón.

El plasma atmosférico no térmico (PANT) es generado, a temperatura ambiente y presión atmosférica, por descarga eléctrica a un gas, lo que provoca la ionización, disociación y excitación de sus moléculas y átomos. En consecuencia, el PANT (figura 11) está constituido por electrones e iones positivos y negativos, radicales libres, átomos y moléculas en estado o no de excitación, y fotones ultravioleta, estando presentes especies reactivas de oxígeno (ROS) y de nitrógeno (RNS), tales como ozono, superóxido, peróxido de hidrógeno, radicales hidroxilo y peroxilo, oxígeno singlete, oxígeno atómico, óxido nítrico o dióxido de nitrógeno, que, al interaccionar con los microorganismos, provocan su inactivación. En comparación con otras tecnologías no térmicas de inactivación microbiana,

el PANT presenta una serie de ventajas muy importantes, como son, el bajo coste de aplicación, el empleo de tiempos cortos de tratamiento, la posibilidad de tratar una amplia variedad de alimentos, incluso previamente envasados, y el ser una técnica medioambientalmente sostenible. Por todo ello, se considera como una tecnología sumamente prometedora para mejorar la calidad microbiológica de los alimentos y descontaminar el material de envasado y las superficies de contacto (López et al., 2019).



Figura 11. Imagen de plasma atmosférico no térmico, tomado de: <https://olhardigital.com.br/2020/11/12/noticias/plasma-frio-pode-eliminar-virus-da-covid-de-superficies-diz-estudo/>

Por otra parte, se ha observado que la exposición directa del agua a la acción del PANT conduce a la obtención de un agua conocida como “agua activada por plasma”, con nuevas propiedades, que persisten durante largos periodos de tiempo, incluso de un mes. Esto es debido a la capacidad que presentan las especies químicas generadas en el PANT de difundir y de interactuar entre sí o con el agua, dando lugar a la formación de nuevas especies químicas.

La presencia de ROS y RNS, incluyendo radicales hidroxilo, oxígeno singlete, anión superóxido, peróxido de hidrógeno, así como óxido nítrico y sus derivados formados con agua, tales como nitratos, nitritos y peroxinitritos, se ha puesto de manifiesto en diversos estudios (Choi et al., 2019; Khan y kim, 2019; Xiang et al., 2019; Zhao et al., 2019, 2020). Además, el tratamiento de agua y otras soluciones acuosas por PANT induce un aumento en su conductividad eléctrica y potencial de óxido-reducción y una reducción en su valor de pH, hasta valores próximos a 3 (Ma et al., 2015, 2016; Joshi et al., 2018; Xiang et al., 2020;

Zhao et al., 2019, 2020; Machado-Moreira et al., 2021). Este interesante fenómeno es un enfoque completamente nuevo, que consistiría primero en “activar” el agua y luego, utilizarla para el tratamiento o procesamiento de los alimentos. Es de destacar que el AAP proporciona una serie de ventajas adicionales frente al tratamiento directo con PANT, como son la facilidad de generación y aplicación, así como su capacidad para ser almacenada, lo que ha conducido a que diversos grupos de investigación estén explorando sus aplicaciones en la industria alimentaria. En este sentido, se ha demostrado que el AAP presenta un gran potencial como estrategia para mejorar la calidad microbiológica de los alimentos, descontaminar superficies de contacto, conseguir los atributos característicos de los productos cárnicos curados sin la necesidad de adicionar nitritos, estimular la germinación de semillas, degradar pesticidas y modificar la estructura del almidón, los cuales se detallaran más adelante.

2.3.1. El AAP en la descontaminación microbiológica de los alimentos

Se ha demostrado que el AAP permite mejorar la calidad microbiológica de los alimentos, tanto de origen vegetal como de origen animal, procesados y crudos, sin afectar negativamente a sus atributos de calidad. Se ha descrito que es capaz de inactivar eficazmente bacterias, mohos y levaduras en frutas por ejemplo, fresas, peras, kiwis, manzanas, arándanos, uvas, lima y hortalizas como tomate, repollo, calabaza, hojas de espinaca y de lechuga, semillas, germinados y hongos comestibles, como champiñones, mejorando su calidad microbiológica y extendiendo su vida útil (Ma et al., 2015, 2016; Guo et al., 2017; Joshi et al., 2018; Chen et al., 2019; Choi et al., 2019; Khan y Kim, 2019; Vaka et al., 2019; Xiang et al., 2019; Zhao et al., 2019; Liu et al., 2020; Xiang et al., 2020; Machado-Moreira et al., 2021). Por ejemplo, el tratamiento de semillas de frijol mungo (*Vigna radiata*) germinadas, durante 30 minutos, con AAP permitió reducir la población de bacterias aerobias totales, así como la de mohos y levaduras, en 2.3 y 2.8 unidades logarítmicas, respectivamente, no detectándose, además, cambios significativos ni en las características sensoriales ni en el contenido en flavonoides y polifenoles totales de los productos tratados (Xiang et al., 2019).

Asimismo, se ha demostrado la capacidad del AAP para la inactivación de microorganismos alterantes y patógenos, incluyendo *Salmonella Enteritidis* y *Staphylococcus aureus*, en carne (Zhao et al., 2018; Kang et al., 2019; Qian et al., 2019; Royintarat et al., 2020), productos cárnicos (Wang et al., 2021) y huevos (Lin et al., 2019). Por ejemplo, se ha observado que la aplicación de AAP sobre carne de vacuno reducía la población bacteriana superficial en 3.1 unidades logarítmicas, lo que permitía alargar entre 4 y 6 días la vida útil de la carne almacenada a refrigeración, sin comprometer su calidad tras la cocción (Zhao et al., 2018).

Además, se ha comprobado que la efectividad antimicrobiana del AAP en la descontaminación de los alimentos se puede potenciar mediante su combinación con tratamientos térmicos moderados (Choi et al., 2019; Xiang et al., 2020) y ultrasonidos (Royintarat et al., 2020), así como mediante la adición de ácido láctico al agua previamente a su tratamiento (Qian et al., 2019).

2.3.2. Descontaminación de equipos y superficies

En la actualidad debido al aumento de la resistencia microbiana a métodos tradicionales de limpieza y sanitización ha provocado la búsqueda de nuevos tratamientos de desinfección, mismos que sean eficaces, efectivos y, además se presenten de manera amigable con el medio ambiente. (Zhou et al., 2018).

Los microorganismos, tienen la capacidad de adherirse a las superficies de los equipos, pudiendo plantear problemas de contaminación cruzada con los alimentos que entran en contacto con ellos, con impactos significativos para la salud y en los operadores industriales, lo que resulta en pérdidas económicas. Son varios los estudios en los que se ha puesto de manifiesto el potencial que presenta el AAP para la inactivación de bacterias, tanto Gram positivas como Gram negativas, y levaduras, incluso cuando se encuentran formando biofilms, en materiales ampliamente utilizados en la industria alimentaria, como acero inoxidable, polietileno de alta densidad y poliestireno. Por ejemplo, en el trabajo llevado a cabo por Fernández-Gómez et al., (2020) se evaluó la influencia ejercida por el tiempo de exposición al AAP sobre la efectividad de esta estrategia para inactivar las células de un cóctel de tres cepas de *L. monocytogenes* adheridas a acero inoxidable y poliestireno (10^6 -

10^7 ufc/cm²), comprobándose que tiempos de tratamiento de 30 y 60 minutos, respectivamente, reducían los recuentos a valores inferiores a 10^2 ufc/cm².

2.3.3. El AAP como agente de curado en productos cárnicos

El agua activada por plasma contiene ROS y RNS, entre los que se encuentran los nitratos y nitritos. Con base en este fenómeno, (Jung et al., 2015) elaboraron salchichas tipo Frankfurt de manera tradicional, sustituyendo los nitritos de las sales del curado por AAP (agua con 1% de pirofosfato sódico tratada, que presentó un contenido de 782 y 358 ppm de nitritos y nitratos, respectivamente), no detectando diferencias entre ambos tipos de productos después de 28 días de almacenamiento refrigerado, ni en los recuentos de bacterias aerobias totales ni en distintos parámetros de calidad (color, aroma, sabor, jugosidad, elasticidad) que determinan su aceptabilidad, con la ventaja adicional de que el contenido en nitritos residuales resultaba un 30% más bajo en las salchichas elaboradas con AAP. Posteriormente, también se ha demostrado el potencial que presentan las salmueras tratadas para el curado de lomo (Yong et al., 2017) y otros cortes de carne.

2.3.4. El agua activada por plasma en la inactivación de microorganismos

(Takai, 2008) trabajó con plasmas en solución fría, soluciones de acetato de sodio y sulfato de sodio y demostró que mataban *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus* en suspensiones altamente concentradas después de 30 segundos de tratamiento.

En el año 2013, Zhang et al., estudiaron el daño celular bacteriano a consecuencia del estrés oxidativo en *Staphylococcus aureus*, mediante la evaluación de los estados estructurales y químicos de la superficie bacteriana. Los resultados demostraron que el contenido de oxígeno aumentó y el contenido de carbono disminuyó, después del tratamiento con AAP.

En el 2020 Clemente et al., inactivaron un cultivo fresco de *Salmonella typhimurium* con distintas aplicaciones de plasma frío, donde se demostró que el AAP es capaz de reducirlo o inactivarlo, teniendo un efecto más marcado en los tratamientos que han resultado más agresivos para el patógeno.

La tecnología de producción de agua activada por plasma también puede ser usada para purificar y/o desinfectar aguas residuales, agua para consumo humano u otro tipo de agua que necesite ser tratada. El sistema utilizado en este proyecto de tesis solo utiliza aire, electricidad y agua, sin la necesidad de añadir químicos.

2.3.5. Descontaminación de semillas

Las semillas pueden contener patógenos de plantas en la cubierta de la semilla o en biopelículas en la superficie (Tsedaley, 2015) los cuales, pueden causar enfermedades en las plántulas una vez que adquieren suficiente densidad de población. Los patógenos contenidos en semillas son difíciles de inactivar a consecuencia de su ubicación y protección de influencias externas. Las semillas se tratan comúnmente con insecticidas y fungicidas, pero también con calor y radiación (Sharma et al., 2015). Los estudios sobre el efecto del plasma en las semillas indican la inactivación microbiana mediada por el plasma. Los tratamientos con argón frío y plasma de aire inactivaron patógenos transmitidos por semillas de arroz dando como resultado una infección fúngica menor en las plántulas emergentes (Khamsen et al., 2016).

2.3.6. El AAP en la producción de germinados

Diversos autores han comprobado que regar las semillas con AAP estimula tanto su germinación como su crecimiento, acortando, de esta forma, el proceso productivo. En este sentido, se ha descrito que la implementación del AAP como agua de irrigación era capaz de acortar a la mitad el tiempo necesario para la germinación de semillas de frijol mungo de 72 a 36 horas, y aumentar, en un 6%, el porcentaje final de germinación (Zhou et al., 2019) además el análisis estadístico realizado por (Liu et al., 2019) mostró que la probabilidad de germinación de frijol mungo, entre otras semillas tratadas es significativamente mayor que en los grupos control para los tratamientos indirectos. Asimismo, se ha visto que cuando la germinación de semillas de lentejas se llevaba a cabo en AAP se obtenían tanto brotes con un tallo más desarrollado como también porcentajes más grandes de semillas germinadas, 80% frente al 30% conseguido al usar agua de la red de suministro. Además, se ha evidenciado que el empleo de AAP en la producción de germinados posibilita además

minimizar la carga microbiana en los productos finales. El nitrato de AAP es absorbido a través de las raíces y este actúa como potenciador del crecimiento de las plantas, está demostrado que el riego con agua activada con plasma mejora la germinación y el crecimiento de las plantas.

Un tratamiento adecuado con agua activada por plasma da como resultado un cambio significativo de sus propiedades como el pH, el potencial de oxidación, la calidad del agua, la mineralización y la composición química, particularmente los compuestos de hidrógeno y nitrógeno juegan un papel crucial en el desarrollo y crecimiento de las plantas.

2.3.7. AAP como técnica de degradación de pesticidas

Se ha visto, asimismo, que el AAP resulta eficaz para minimizar el contenido en pesticidas, habiéndose descrito que la inmersión de uvas (Zheng et al., 2019) y tomates en AAP a lo largo de 10 y 15 min, respectivamente, lograba reducir marcadamente la concentración de foxim (en un 73.60%) y clorpirifos (en un 51.97%), sin perjudicar de manera significativa los atributos de calidad de la fruta. Aun cuando se estima que son las ROS y RNS presentes en el AAP, incluyendo el ozono y el radical hidroxilo, las causantes de la degradación de los pesticidas, parece que la coexistencia de condiciones ácidas resulta clave en el proceso degradativo.

2.3.8. El AAP como agente coadyuvante en la modificación de la estructura del almidón

El almidón es extensamente empleado en la industria alimentaria. No obstante, la implementación del carbohidrato en determinadas aplicaciones necesita de una modificación de su composición nativa, lo cual posibilita mejorar sus características funcionales. Una técnica de modificación usada es el procedimiento del almidón nativo en condiciones de calor y humedad.

Recientemente, se demostró que la sustitución del agua destilada por AAP a lo largo de este método conducía a la obtención de un almidón de maíz que presentaba una mayor solubilidad y un contenido más alto en almidón resistente (Yan et al., 2020).

El tratamiento con agua activada con plasma da como resultado un cambio significativo de sus propiedades como el pH, el potencial de oxidación y reducción (ORP), la conductividad y la concentración de especies reactivas de oxígeno y nitrógeno (RONS) (Sánchez, 2018). En ocasiones, las plantas son vulnerables a los ataques de patógenos así como al estrés ambiental, puesto que están expuestas a ambientes hostiles en condiciones naturales, sin embargo, han desarrollado un sistema de autodefensa mediante el cual las especies reactivas de oxígeno y nitrógeno (RONS) actúan como reguladores de este estrés ambiental, y en este caso, el agua activada con plasma frío (AAP) ayuda a activar los componentes del sistema inmunológico de la planta protegiéndola así del ataque de diversos patógenos.

2.4. Propiedades fisicoquímicas de AAP

2.4.1 pH

El pH es la medida de la concentración de iones de hidrógeno en una solución. Las reacciones que tienen lugar entre las especies químicas formadas en el plasma y el agua dan como resultado la acidificación. El pH de AAP se reduce drásticamente con el aumento del tiempo de tratamiento debido a la formación de ácidos fuertes.

La generación de AAP da como consecuencia un pH controlado (de 0 a 7). Oehmigen et., al 2010 han reportado que la acidificación de líquidos acuosos por medio de la reacción del plasma da como consecuencia la generación de peróxidos de hidrógeno, ácido nítrico y ácido peroxinitroso. Las formaciones de especies químicas recién formadas en AAP se atribuyen a la disminución del pH, y este podría ser una de las causas más importantes de la actividad antimicrobiana de AAP.

2.4.2. Conductividad eléctrica

Es la medida de la capacidad inherente del agua para conducir el flujo de corriente eléctrica a través de ella. Cuando hay presencia de iones extraños en el agua se puede observar una afección en gran medida en la conductividad. En 2008, Lukes et al.; realizaron un estudio sobre el efecto entre el voltaje aplicado y la conductividad del agua sobre la intensidad de la radiación ultravioleta formada a partir de la descarga de corona. Y notaron que un aumento en la conductividad del agua influía mucho en la intensidad de la emisión de la radiación ultravioleta y observaron un aumento similar en la potencia radiada en el rango de UV.

2.4.3. Producción de peróxido de hidrógeno

El H_2O_2 es una especie reactiva del oxígeno formado en el agua activada por plasma, el cual, juega un papel fundamental en las propiedades antimicrobianas de AAP. Varios científicos investigaron los procesos químicos para la formación de H_2O_2 y evaluaron su importancia para la actividad antimicrobiana de AAP. Algunos métodos analíticos para la medición de H_2O_2 incluyen ensayos como son: la titulación yodométrica, titulación de permanganato, oxalato de titanio.

En el 2004, Stara y Krčma, estudiaron la generación de H_2O_2 a partir de la descarga en el agua e investigaron los factores que influyen en la producción de peróxido de hidrógeno. Estos autores han comunicado que el voltaje aplicado y la duración de la descarga aumentaron linealmente la formación de peróxido de hidrógeno.

Sin embargo, el mecanismo por el cual se genera H_2O_2 en AAP puede variar entre diferentes sistemas y sigue siendo un tema de debate.

2.4.4. Nitritos NO_2^- y Nitratos NO_3^-

La existencia de iones de nitrito y nitrato en sistemas basados en plasma muestra de manera directa la generación de especies reactivas de nitrógeno lo cual, ha generado un importante interés de investigación recientemente, en especial, por sus características antibacterianas

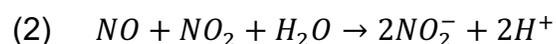
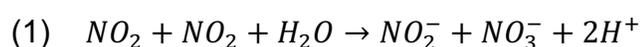
incluso llegando a ser una opción más a los fertilizantes orgánicos para impulsar el crecimiento en las plantas.

Por un lado, se estima que los iones nitrito y nitrato de extensa duración formados como productos secundarios en la solución activada por plasma tienen una profunda capacidad bactericida en espacios ácidos. Sin embargo, los RNS desempeñan dos funcionalidades primordiales en la agricultura actualizada:

- 1) Son absorbidos por enzimas vegetales (como la nitrato reductasa), como nutriente, lo cual resulta en la generación de compuestos nitrogenados y aminoácidos.

Basado en estudios realizados por Zhang et al.; tienen la posibilidad de mantener el control de puntos del metabolismo y desarrollo de las plantas, como una molécula de señalización (Zhang et al., 2017; Marschner, H., 2011; Pérez- Fernández et al., 2006; Monaco et al., 2003).

2) El mecanismo de formación de nitritos y nitratos en el agua es el resultado de la disolución de los óxidos de nitrógeno formados en el plasma de aire por reacciones en fase gaseosa de N_2 y O_2 disociados a lo largo de la descarga (Zhou et al., 2015). Junto con la formación de NO_2^- y NO_3^- en el agua tratada con plasma, la disolución de NO_x en el agua conduce a la disminución del pH (Lukes et al., 2012)



El amonio y el nitrato son fuentes predominantes de nitrógeno que absorben las plantas para su crecimiento desde el suelo. La generación de nitratos en AAP se puede lograr mediante la descarga de plasma y pueden servir como una fuente alternativa de nitrógeno para el crecimiento de las plantas.

Con base en la figura 12, los mecanismos de inactivación de AAP especulados pueden clasificarse en 4 pasos.

- 1) Se crean una secuencia de RONS primarios y secundarios en AAP, lo cual conduce a la reducción del pH, crecimiento de ORP y conductividad eléctrica, lo cual produce estrés físico en las células microbianas.
 - 2) Las RONS en AAP tienen la posibilidad de provocar estrés oxidativo, que no solo deshace la composición del peptidoglicano en la pared celular, sino que además inicia la peroxidación de lípidos y proteínas en la membrana celular, lo cual, da como consecuencia la despolarización del potencial de la membrana celular.
 - 3) Los RONS tienen la posibilidad de moverse por medio de los poros al entorno interno, lo cual lleva a la acumulación de RONS intracelulares. Mientras tanto, los protones en AAP además tienen la posibilidad de fluir hacia la célula, disminuyendo consecuentemente el pH intracelular.
 - 4) Las RONS intracelulares tienen la posibilidad de oxidar elementos intracelulares, entre ellos el ADN, las proteínas, los lípidos y los carbohidratos, lo cual da como consecuencia la fragmentación del ADN y las proteínas oxidadas, que tienen la posibilidad de fluir hacia la AAP por medio de los poros formados en la membrana.
- (Lukes et al., 2012)

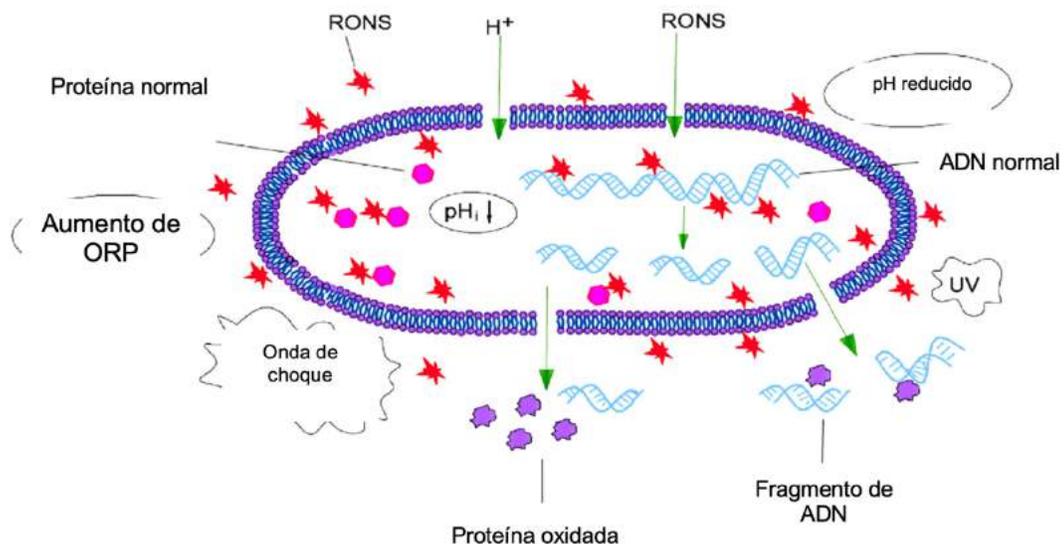


Figura 12. Mecanismos de inactivación bacteriana del agua activada por plasma en el aspecto oxidativo y físico (Lukes et al.; 2012)

2.4.5. Salinidad

El término salinidad es una medida que se define como la concentración total de sales minerales inorgánicas disueltas (Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- y CO_3^{2-}) en el agua o en el suelo. La salinidad es cuantificada en términos de la concentración total de sales solubles, o más prácticamente, en términos de la conductividad eléctrica (CE) de la solución (SAR, 2008).

Debido a que la cantidad de iones disueltos aumenta en ambos valores de la salinidad y la conductividad eléctrica, estos se encuentran relacionados entre sí.

2.4.6. Total de sólidos disueltos

Los sólidos disueltos, se refieren a cualquier sal, mineral o metal, en forma de moléculas, átomos, cationes o aniones diluido en el agua. Los sólidos totales disueltos (TDS) comprenden las sales inorgánicas (principalmente calcio, magnesio, potasio, sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos) y pequeñas cantidades de materia orgánica que se disuelven en el agua. La concentración de TDS es la suma de todas las sustancias filtrables presentes en el agua que pueden determinarse gravimétricamente. En la mayoría de los casos, sin embargo, los TDS están compuestos principalmente de iones.

2.5. Sistema de tratamiento

Se utilizó un reactor tipo Batch el cual fue diseñado y construido en colaboración entre el Laboratorio de Física Avanzada (FC-UAEMex) y el Laboratorio de Análisis y Sustentabilidad Ambiental (EESX-UAEM), para producir plasma sobre la superficie de la muestra líquida. El plasma es generado con una fuente de voltaje de corriente directa (HP Mod. 6525A, 4.0 kV-50 mA), a una potencia constante de 80W. Un diagrama del reactor se muestra en la figura 13.

La caja que soporta el sistema es de material acrílico, cuenta con un maneral que permite maniobrar de forma sencilla el ánodo (barra de tungsteno) que se encuentra dentro de la caja; es en el ánodo donde se genera el plasma sobre la superficie del líquido.

2.5.1. Reactor de plasma

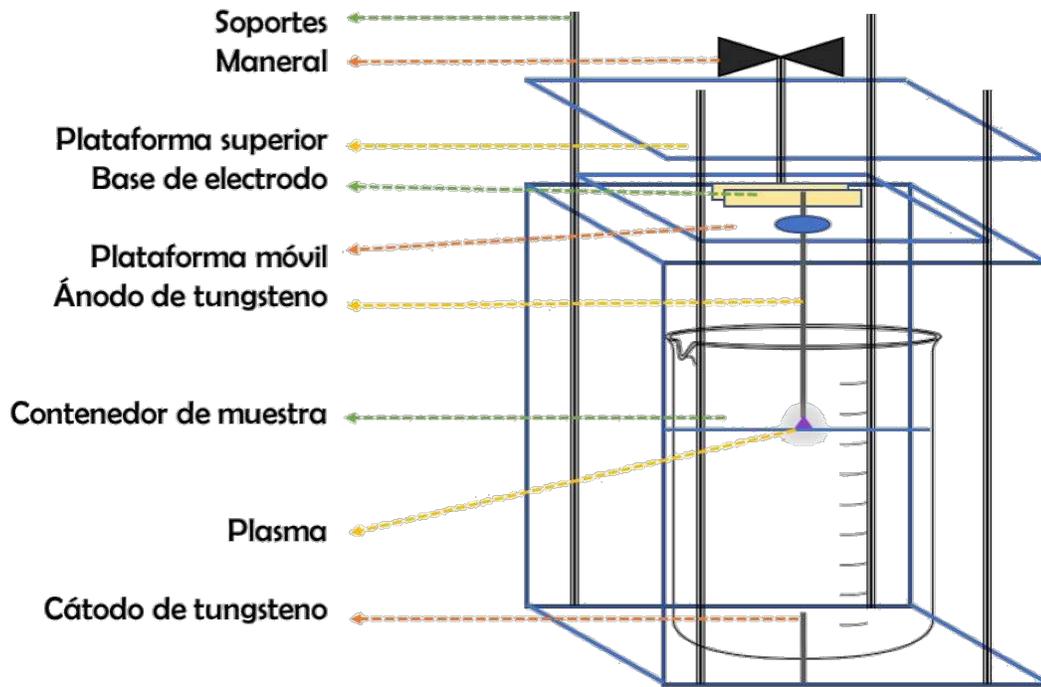


Figura 13. Diagrama de las partes del reactor de plasma a presión atmosférica.

Dentro del contenedor se encuentra un vaso de precipitado de 400 ml en el cual son colocadas las muestras para realizar su tratamiento. El vaso de precipitado se encuentra cerrado con una tapa de acrílico en cuyo centro se realizó un orificio por el cual es introducido el ánodo (tungsteno), este es manejado con el maneral para que entre en contacto con la superficie del líquido. En la parte inferior del vaso se realizó otro orificio en donde se introduce un cátodo (tungsteno), este se encuentra dentro de la solución, y está sellado para evitar derrames.

Para que el plasma pueda ser generado y se mantenga estable, es necesario ajustar el ánodo sobre la superficie del líquido, que a su vez está conectado a una fuente de poder de corriente directa de alto voltaje, así la parte de la corriente positiva es conectada en la parte superior del ánodo, y la corriente negativa es conectada a la parte inferior del cátodo.

2.6. Agua activada por plasma y su aplicación en la agricultura

Se realizó una investigación de las semillas de mayor interés en México y de acuerdo a la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (24 de septiembre de 2020), son, el maíz, frijol, calabaza, chile y amaranto, cada una con propiedades y usos particulares muy presentes en las costumbres y gastronomía mexicana. En este proyecto se utilizaron semillas de frijol ayocote morado para la aplicación del agua activada por plasma en la agricultura.

El frijol representa un cultivo clave en la dieta nacional debido a que constituye una fuente importante de proteína, carbohidratos, fibra y minerales. El Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera reporta que tan solo en el 2019, se sembraron 1,412,097.69 hectáreas de frijol en el territorio nacional. Actualmente se conocen más de 150 variedades de frijoles, de las cuales sólo una tercera parte se encuentran en México; algunas de ellas son el frijol blanco, al que también se le conoce como alubia, negro, flor de mayo, morado, pinto, canario, y ayocote.

El frijol ayocote (figura 14) es una planta herbácea, anual, cultivada, originaria de México. Su nombre científico es *Phaseolus coccineus* L. conocido como frijol bóttil, frijol tecómare o patol, es una leguminosa cuyo centro de origen y domesticación se ubica en México. El peso por semilla varía de 0.86 hasta 1.8 gramos, por lo cual se encuentra dentro del rango de “semillas grandes”, por lo que también es llamado frijolón. Actualmente se cultiva y consume prácticamente en todo el mundo y en nuestro país principalmente en los estados de México, Puebla, Tlaxcala e Hidalgo (Vargas et al., 2009).



Figura 14. Semilla de frijol ayocote morado

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este capítulo se explica la parte experimental de la caracterización del agua activada por plasma, además se enlista el material y reactivos utilizados.

3.1. Material y equipo

A continuación, en la tabla 1, se presentan los reactivos utilizados en la experimentación para la caracterización del agua activada por plasma.

Tabla 1. Reactivos utilizados en la parte experimental.

Reactivo	Imagen	Fórmula	Peso Molecular	Marca
Kit de prueba para Peróxido de Hidrógeno		H_2O_2	34.0147 g/mol	HACH Modelo HYP-1 Cat. No. 2291700-LM
Nitrito TNT 839		NO_2^-	46.0050 g/mol	HACH TNT839-LM
Nitrato TNT 835		NO_3^-	62.0049 g/mol	HACH TNT835-LM

En la tabla 2, se presentan los materiales usados en las pruebas agrícolas.

Tabla 2. Material usado en las pruebas agrícolas.

Material	Imagen
Frijol ayocote morado	
Charola de germinación de unicel de 200 cavidades	
Sustrato de esfagno grado hortícola Cosmopeat	

El equipo utilizado en la parte experimental se describe en la tabla 3. Las funciones y fotografía se presentan en la tabla 4.

Tabla 3. Equipo utilizado en la caracterización del Agua Activada por Plasma.

Equipo	Marca
Espectrofotómetro	Dr3900 HACH
Multiparámetro	HACH Pocket Pro+ Multi 2
Fuente	HP 6525A DC Power Supply

Tabla 4. Funciones y fotografía de cada uno de los equipos utilizados en la parte experimental.

Equipo	Características
 <p>The image shows a compact, dark blue spectrophotometer with a color LCD screen on top displaying various data points and graphs. It has a sample compartment on the front.</p>	<p>El espectrofotómetro DR-3900 permite el escaneo de longitud de onda a una velocidad alta a lo largo del espectro ultravioleta y visible, por otra parte, también incluye algunos métodos para análisis de aguas potables y residuales.</p>
 <p>The image shows a handheld, blue and black multiparameter probe with a digital display on the handle showing '7.00' and '25.00'. It has a sensor tip at the bottom.</p>	<p>El multiparámetro HACH permite medir ciertas variables tales como pH, conductividad eléctrica, temperatura, salinidad, y total de sólidos disueltos</p>
 <p>The image shows a rack-mountable power supply unit with a grey faceplate. It features two large analog meters, several indicator lights, and a power switch on the right side.</p>	<p>La fuente de poder es un aparato electrónico que sirve para brindar el suministro de energía, regular y filtrar la electricidad al sistema para que pueda operar de manera óptima</p>

3.2. Medición de propiedades fisicoquímicas del agua activada por plasma

Para que la medición de las propiedades fisicoquímicas del agua tratada fuera medida inmediatamente después completar el tiempo de tratamiento, el sistema se montó de la siguiente manera (figura 15).

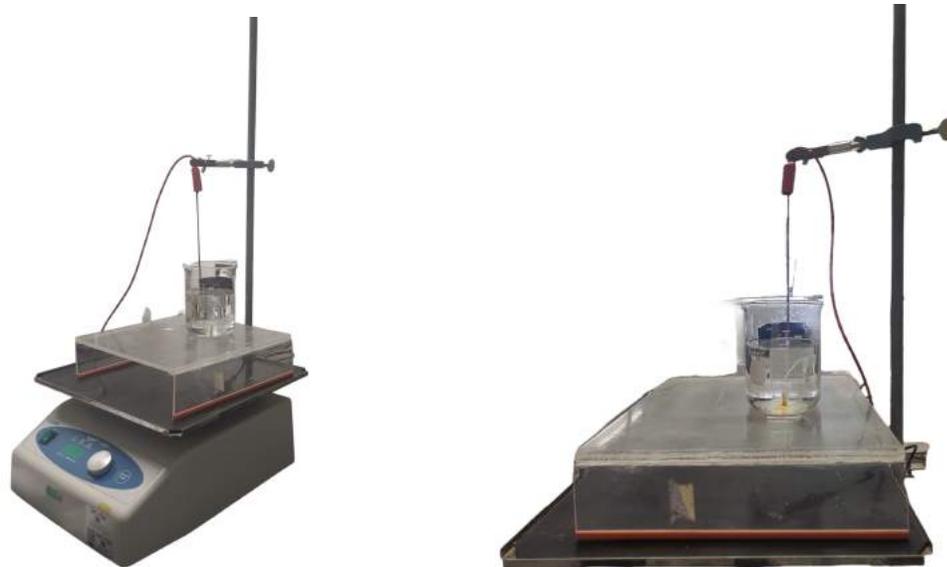


Figura 15. Sistema de tratamiento utilizado

Se comenzó aforando un matraz de 250 mL con el agua a tratar. Después, se enjuagó con agua destilada el vaso de precipitado del reactor, se secó y colocó cuidadosamente en el agujero de la base de acrílico, verificando que estuviera colocado correctamente. Se conectó el cable negativo a la parte inferior del cátodo, y el cable positivo en la parte superior del ánodo. Se conectó y encendió la fuente de poder, se colocaron los valores a 40 mA, y 2000 volts.

Se estudiaron 250 mL de agua del pueblo de Apatlaco y del laboratorio sometida a diferentes tiempos de exposición al plasma: 0 (testigo), 30 segundos, 1, 3, 5, 10, 15, 20 y 30 minutos (figura 16). Repitiendo el procedimiento del párrafo anterior para la medición de cada muestra. Terminado el tiempo de tratamiento, con el multiparámetro HACH se tomaron los siguientes parámetros, pH, temperatura, conductividad eléctrica, total de sólidos disueltos, y salinidad (figura 17).



Figura 16. Imagen del plasma activando el agua



Figura 17. Medición de variables con multiparámetro HACH

Para la determinación de nitritos, nitratos y peróxido de hidrógeno se llevaron a cabo distintos procedimientos para cada prueba siguiendo el método HACH.

Las pruebas fueron realizadas para cada intervalo de tiempo de tratamiento y un testigo, la metodología se describe a continuación.

3.2.1. Procedimiento para la determinación de nitrito TNT 839 HACH

El procedimiento para realizar la prueba en tubos de nitritos en las muestras a analizar por el método HACH es el siguiente:

- 1.- Se retiró cuidadosamente el papel aluminio del Dosicap, después se pipetearon 2 mL de la muestra de agua a analizar y se adicionaron al vial suministrado por Hach.
- 2.- Se tapó el vial inmediatamente, de modo que la parte rugosa de la tapa quedara hacia arriba.
- 3.- Se invirtió el vial vigorosamente hasta que quedó totalmente disuelto.
- 4.- Una vez transcurrido los diez minutos de espera, se limpió el vial con un pañuelo y se introdujo en la canastilla del espectrofotómetro DR3900 HACH para su evaluación.

3.2.2. Procedimiento para la determinación de nitrato TNT 835 HACH

- 1.- Se pipeteó 1 mL de la muestra a analizar en el vial.
- 2.- Se adicionó 0.2 mL de la solución A, suministrada por HACH.
- 3.- Se cerró el vial, y se invirtió un par de veces hasta que se observó una mezcla homogénea.
- 4.- Transcurridos 15 minutos, se introdujo el vial en la canastilla y se evaluó en el espectrofotómetro DR 3900 HACH.

3.2.3. Procedimiento para determinación de peróxido de hidrógeno con kit de prueba HACH modelo HYP-1 Cat. No. 2291700-LM.

Preparación de muestras.

- 1.- Se llenó la cubeta de muestras de vidrio hasta la marca con la muestra a analizar.
- 2.- Se agregó 1 mL de la solución de molibdato de amonio y posteriormente se adicionó un sobre de reactivo en polvo de sulfito a la cubeta de muestra.
- 3.- Se tapó e invirtió la muestra repetidamente para mezclar. Fue necesario esperar cinco minutos para continuar con el siguiente paso.

Procedimiento para la prueba de rango alto 1 gota = 1mg/L de peróxido de hidrógeno.

- 4.- Se llenó el tubo de medición de plástico hasta el tope con la muestra preparada del paso 3, después se virió la muestra del tubo de medición de plástico en el matraz Erlenmeyer de 50 mL.
- 5.- Se añadió gota a gota titulante de tiosulfato de sodio al matraz Erlenmeyer, moviendo constantemente la muestra en el matraz, sosteniendo el gotero de manera vertical, contando cada gota a medida que se añade.
- 6.- Se continuó agregando el titulante hasta que la muestra perdió todo el color azul o se tornó amarilla.
- 7.- Se evaluaron resultados de cada muestra.

3.2.4. Procedimiento siembra de frijol ayocote

Se seleccionaron 180 semillas de frijol ayocote que tuvieran la mejor calidad física en cuanto a color, brillo, tamaño, y similitud, además de que no tuvieran daños mecánicos para una menor dispersión de datos (figura 18).

Luego, en una charola de germinación de unicel rotulada con cada tratamiento y el testigo, se colocó sustrato de esfagno de grado hortícola Cosmopeat hasta llenar las 180 cavidades (figura 19).



Figura 18. Selección de las semillas de frijol ayocote



Figura 19. Colocación del sustrato Cosmopeat en la charola de germinación

Posteriormente, el día miércoles 28 de septiembre del 2022 a las 12:00 p.m., se sembraron las semillas fila por fila, cada una con 20 semillas, comenzando por el testigo, 30, 20, 15, 10, 5, 3, 1, y 0.5 minutos respectivamente.

Después, se les dió un riego pesado a cada fila con el agua activada por plasma obtenida usando el sistema de tratamiento de la figura 13, dependiendo el tiempo de exposición y al testigo con agua de Apatlaco.

Al finalizar de regar todas las filas, la charola se dejó en un lugar donde le diera la luz del sol indirecta. Se mantuvo en observación para contemplar resultados, descritos en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El agua para realizar el estudio se obtuvo de la localidad de San Pedro Apatlaco perteneciente al municipio de Ayala (señalado en la figura 20) dividido en 28 comunidades y 1 Cabecera Municipal, el cual, se encuentra ubicado en la parte central del estado de Morelos y tiene una extensión territorial de 345.68Km², que representa 6.97% de la extensión territorial del estado. Se localiza geográficamente al norte a una latitud de 18°49'51", al sur a 18°33'51", al este a una longitud de 98°50'8" y 99°5'41" al oeste. El municipio colinda al norte con los municipios de Yauatepec, Cuautla y Yecapixtla, al sur con Tepalcingo y Tlaquiltenango; al este con Temoac, Jantetelco y Jonacatepec y al oeste con Tlaltizapán y Yauatepec.

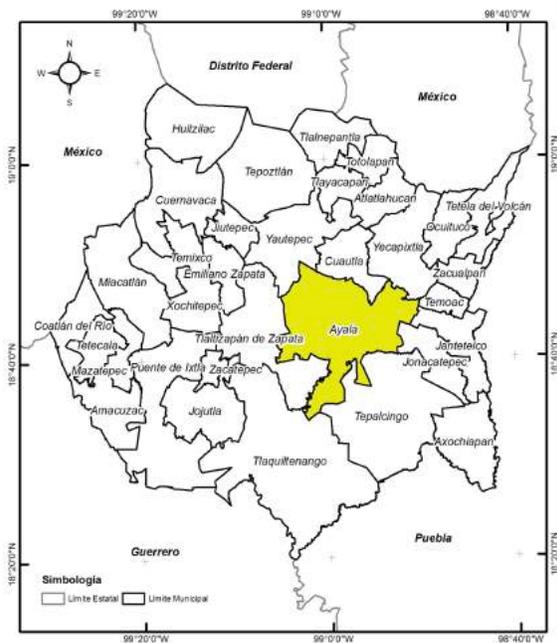


Figura 20. Mapa del estado de Morelos.
Fuente: Secretaría de Hacienda. Dirección General de Información Estratégica. Con datos Marco Geoestadístico 2010, del INEGI.

4.1. Gráficas de variables medidas

Mediante el uso del programa Origin Pro 2019b, se graficaron los datos obtenidos de la tabla 5, de las propiedades temperatura, pH, conductividad eléctrica, salinidad y TDS con respecto al tiempo de tratamiento de cada muestra del agua de casa del poblado de San Pedro Apatlaco.

La temperatura inicial del fluido a temperatura ambiente sin tratamiento fue de 25.5°C, al primer minuto de exposición al plasma hubo un aumento mínimo en la temperatura de medio grado aumentando a 26°C, en los siguientes minutos del tratamiento, los valores fueron aumentando de manera paulatina en cada medición. Entre mayor fue el tiempo de “activación” con plasma, la temperatura fue aumentando de forma gradual.

Finalmente en la figura 21 se observa que a los 30 minutos de tratamiento se alcanzó una temperatura máxima de 48.4°C.

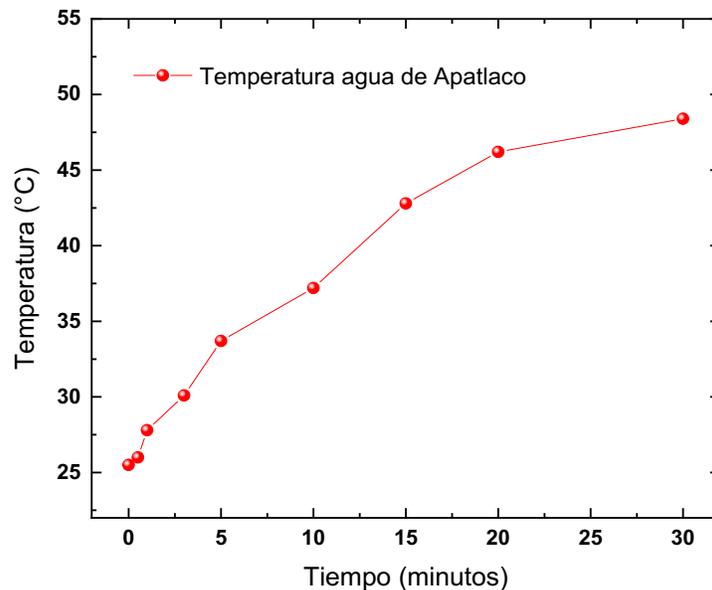


Figura 21. Aumento de la temperatura en AAP

Los valores de pH de las muestras tratadas con plasma se midieron en función del tiempo de tratamiento. El pH inicial del agua sin tratar era de 6.45, luego se puede observar que a los 30 s de tratamiento el pH sube a 6.89, y en los siguientes intervalos va decreciendo de forma constante (figura 22). Teniendo un deceso súbito muy notable a partir de 10 minutos de tratamiento, en el cual disminuyó de 6.09 a 4.16.

Finalmente, a los 30 minutos de tratamiento el pH se redujo hasta un valor de 3.0. Resultando un pH ácido, el cual juega un papel muy importante en el efecto bactericida del agua activada por plasma.

La formación de nuevas especies químicas formadas en el agua activada por plasma se atribuye a la disminución de los valores de pH.

Los productos químicos más probables que contribuyeron a la acidificación del AAP podrían ser el ácido nítrico y el ácido nitroso, que se generan a partir de NO_2 y NO en el plasma.

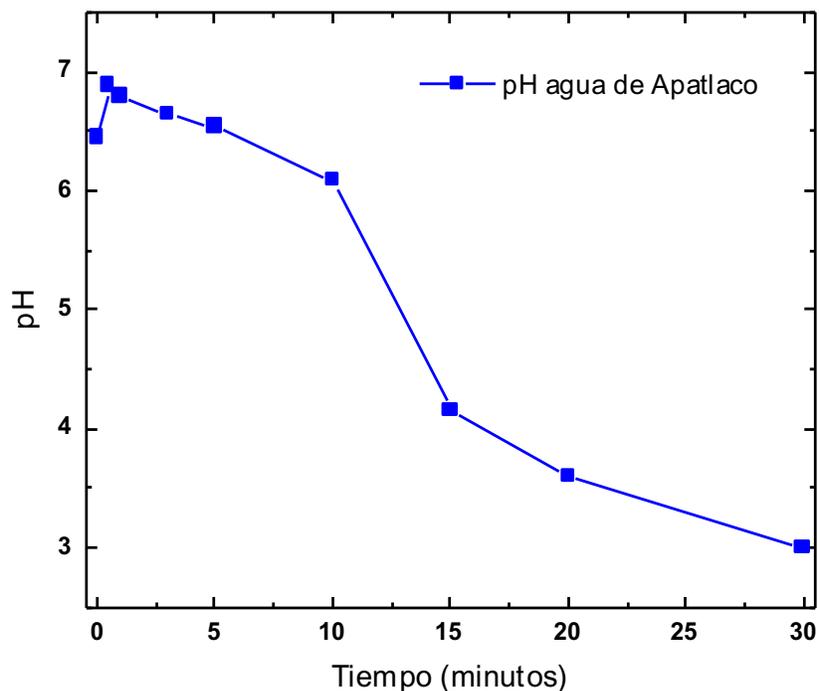


Figura 22. Valores de pH de AAP donde se observa una tendencia descendiente

La conductividad eléctrica inicial del fluido era de 240 μS , luego se nota una decaída al inicio del tratamiento a los 30 s, donde a partir de ahí empieza a ir aumentando lentamente. Se puede observar en la figura 23 que la conductividad eléctrica aumentó de manera significativa a partir de los 15 minutos de exposición al plasma y así sucesivamente para los siguientes dos tiempos de 20 y 30 minutos.

Finalmente, la conductividad eléctrica alcanzó un valor máximo de 730 μS a los 30 minutos de activación.

Las especies reactivas y los iones producidos durante la exposición con plasma se disuelven fácilmente en el líquido, lo que evidentemente alteró la conductividad. La formación de ROS y RNS durante la activación del agua por plasma contribuyó a un aumento en la conductividad de AAP.

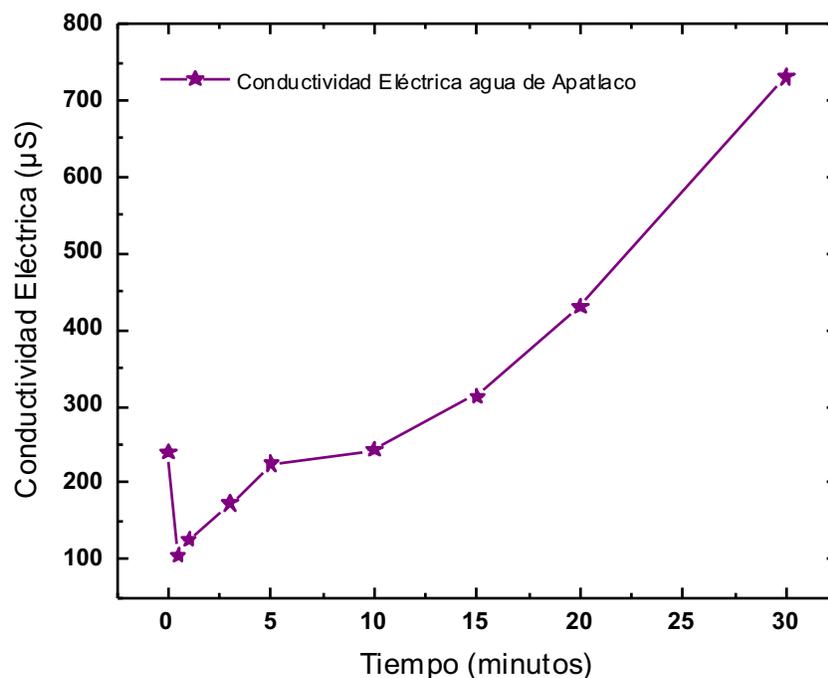


Figura 23. Valores de C.E. de AAP con tendencia ascendente.

Al verse relacionados la conductividad eléctrica con la salinidad y el TDS se espera que sus gráficas presenten cierta similitud. El comportamiento de la C.E. fue creciendo exponencialmente por lo cual los valores de TDS (figura 24) y salinidad (figura 25) se comportan de la misma manera esto es debido a que la cantidad de iones disueltos aumentan los valores de ambas, por lo cual, da como resultado una solución conductora de electricidad.

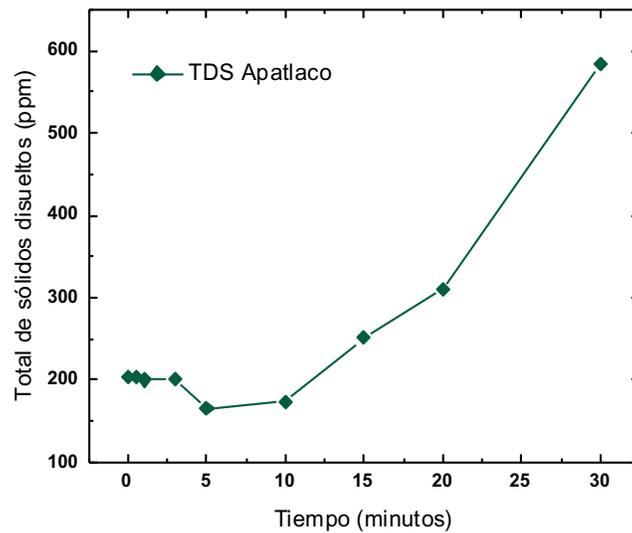


Figura 24. Valores de TDS en AAP de Apatlaco

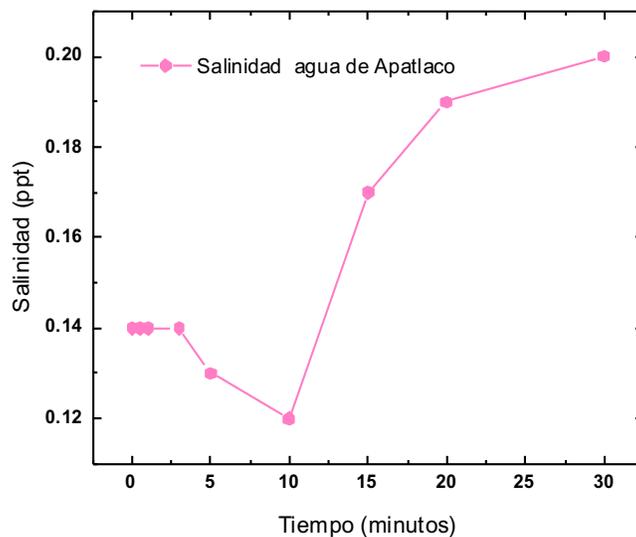


Figura 25. Valores de salinidad en AAP de Apatlaco

En resumen, los valores obtenidos de las variables medidas se presentan en la tabla 5 a continuación.

Tabla 5. Parámetros fisicoquímicos obtenidos del agua de casa del poblado de Apatlaco

Muestra	Tiempo (min)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad eléctrica (µS)	Total de sólidos disueltos (ppm)	Salinidad (ppt)
Testigo	0	6.45	25.5	240	204	0.14
1	0.5	6.89	26	105	204	0.14
2	1	6.80	27.8	125	200	0.14
3	3	6.64	30.1	172.6	201	0.14
4	5	6.54	33.7	225	165	0.13
5	10	6.09	37.2	243	174	0.12
6	15	4.16	42.8	314	251	0.17
7	20	3.60	46.2	430	311	0.19
8	30	3.0	48.4	730	584	0.20

Los resultados de la determinación de nitratos, nitritos y peróxido de hidrógeno por el método Hach se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Propiedades fisicoquímicas obtenidas del agua del poblado de Apatlaco

Muestra	Tiempo (min)	Nitritos (mg/L)	Nitratos (mg/L)	H₂O₂ (mg/L)
Testigo	0	0.015	1.57	0.2
1	0.5	0.243	2.27	1.4
2	1	0.546	2.75	4
3	3	1.410	4.24	9.8
4	5	1.240	3.75	10
5	10	1.290	4.36	11.6
6	15	0.189	4.51	10.6
7	20	0.031	5.27	12
8	30	0.029	10.8	14.6

La concentración inicial de nitritos en los primeros intervalos de exposición al plasma aumentó de manera notable hasta los 15 minutos de tratamiento donde se observa una caída súbita que se mantiene estable hasta los 30 minutos de tratamiento (figura 27). En los tubos de la prueba por el método HACH al reaccionar los nitritos presentes en el agua activada por plasma con las aminas primarias en solución ácida de la prueba en tubo HACH se produjo una reacción colorimétrica con la formación de un complejo con color rosado (figura 26), el cual, la intensidad es directamente proporcional a la cantidad de nitritos en la muestra. Las mayores concentraciones de nitritos se obtuvieron a los 3, 5, y 10 min, la cual, se determinó tras medir la absorbancia espectrofotométricamente.

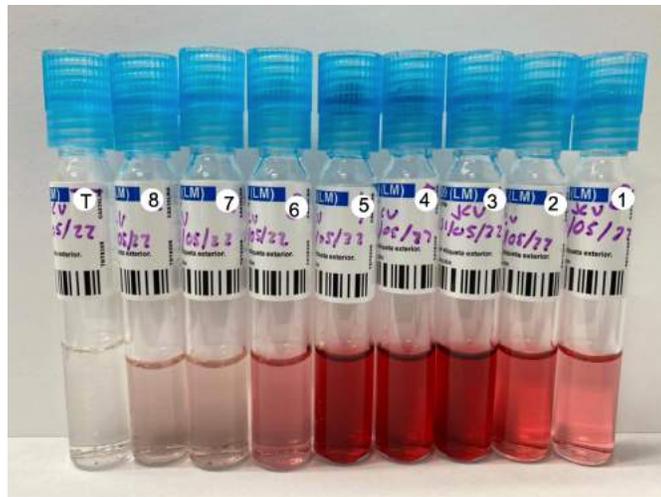


Figura 26. Concentración de nitritos en AAP de Apatlaco determinados por el método HACH

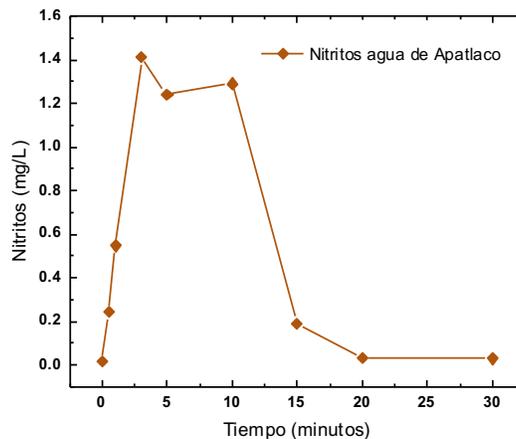


Figura 27. Gráfica de valores de nitritos en AAP de Apatlaco

En la gráfica de valores de nitratos (figura 28), se puede notar que la concentración aumentó gradualmente en función del tiempo de activación por plasma del agua, a los 5 minutos de tratamiento hubo una ligera disminución, la cual, a los 10 min empieza a subir de nuevo, donde finalmente es claro un aumento paulatino en la concentración a los 30 minutos de exposición. Este aumento se debe a las condiciones ácidas del medio, consecuencia de la disminución del pH donde anteriormente en la figura 22 observamos que a los 10 minutos de tratamiento hubo un deceso significativo en los valores.

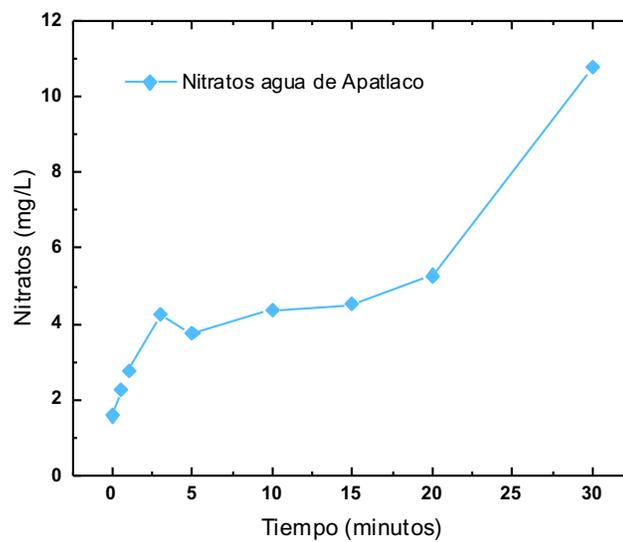


Figura 28. Gráfica de valores de Nitratos en AAP de Apatlaco

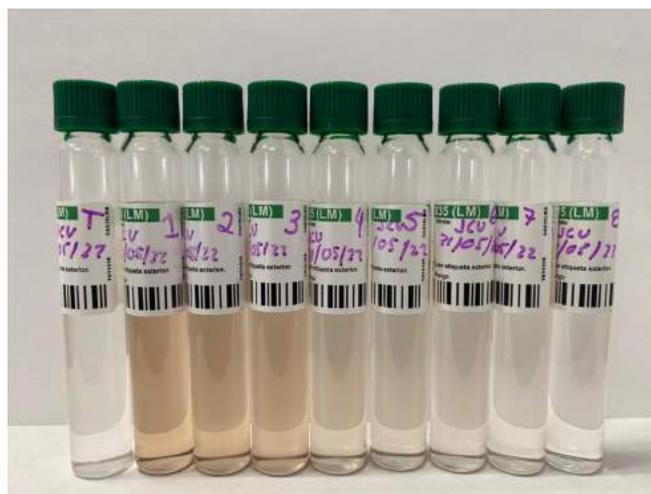


Figura 29. Concentración de nitratos en AAP de Apatlaco determinados por el método HACH

En la gráfica de la figura 30 se muestra que el H_2O_2 inicial para el testigo era de 0.2 mg/L donde los valores fueron aumentando conforme fue transcurriendo el tiempo de exposición al plasma, en 30 minutos de tratamiento se obtuvo un valor máximo de 14.6 mg/L por lo cual se observa una diferencia significativa en comparación con el control.

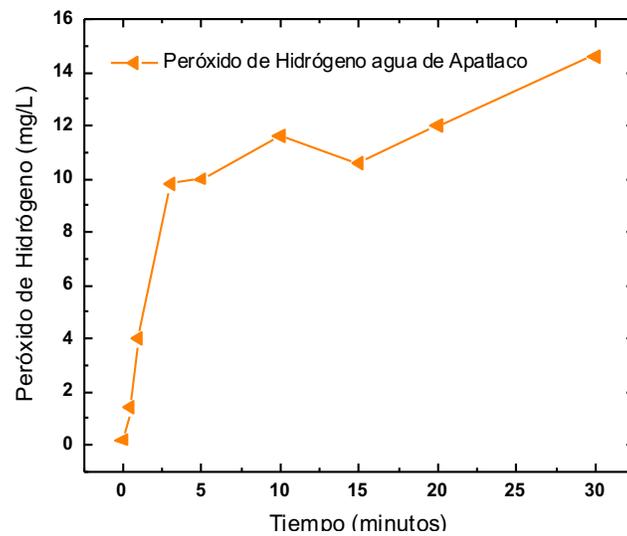


Figura 30. Gráfica de valores de peróxido de hidrógeno en AAP de Apatlaco



Figura 31. Momento exacto en que la muestra cambio de color al momento de realizar una de las pruebas de H_2O_2

4.2. Comparación de tratamientos en la siembra de frijol ayocote regado con AAP

28 de septiembre del 2022

Se sembraron las semillas de frijol ayocote morado (figura 32), y se dio riego pesado con AAP según el tiempo de exposición que corresponde, y el testigo con agua. Al principio se dieron riegos diarios de 10 ml, lo cual, fue suficiente para hidratar el sustrato y a medida que las plantas fueron creciendo, el requerimiento de agua en cada celda fue mayor, por lo que el riego se aumentó a 15 ml.



Figura 32. Semillas de frijol ayocote que se sembraron en la charola de germinación

03 de octubre del 2022

Al quinto día de haber sembrado las semillas comenzaron a germinar (figura 33), en donde se notó que los cotiledones comenzaron a ser visibles fuera del sustrato.

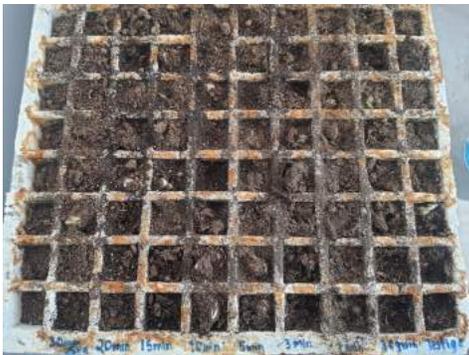


Figura 33. Comienzo de la germinación del frijol ayocote

04 de Octubre del 2022

A un día de comenzada la germinación el desarrollo de la semilla de frijol ayocote era muy notorio, con un promedio de 3 a 4 cm de altura por planta, siendo los individuos tratados con el AAP de 20 min los que denotan una mejora visible en el crecimiento respecto a los demás tratamientos (figura 34).



Figura 34. Plantas de frijol ayocote al sexto día de sembradas

A	B	C	D	E	F	G	H	I
0 min	0.5 min	1 min	3 min	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min

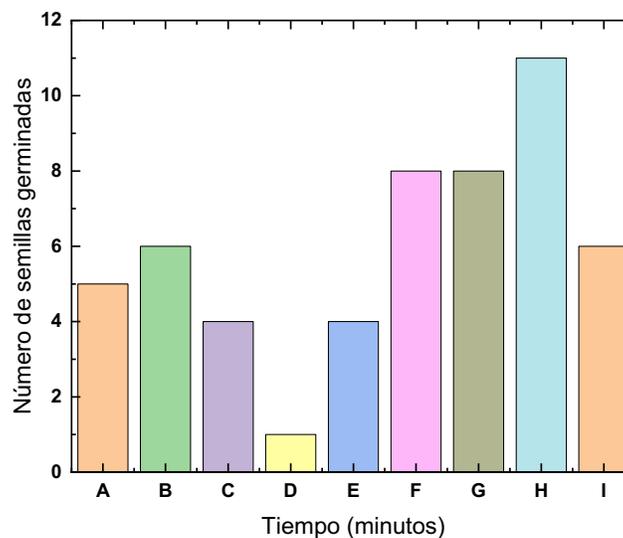


Figura 35. Gráfica del número de semillas germinadas a un día de empezar la germinación

05 de Octubre del 2022

Las mejorías del tratamiento con 20 min de exposición al plasma siguen siendo ligeramente más marcadas, presentando rasgos distintos respecto a los demás tratamientos, mediante un análisis cualitativo se determinaron plantas de mayor tamaño, mayor número de semillas germinadas, color más intenso, tallo más grueso, hojas de mayor tamaño, entre otros (figura 36).



Figura 36. Comparación de crecimiento de frijol ayocote al séptimo día de siembra.

07 de octubre del 2022

Para este punto el desarrollo de la planta ya era muy marcado, el tamaño de las plantas se observó mediante un análisis cualitativo (figura 37). Se presentó un aumento considerable para todas las semillas regadas con AAP, siendo el tratamiento de 20 min el más satisfactorio, pues aunque presentaban un tamaño parecido, este tratamiento seguía destacando sobre los demás, el tamaño de la planta, el ancho del tallo y el tamaño de las hojas, era muy distinto al de los otros tratamientos, teniendo un promedio de crecimiento de 20 cm. Se contabilizó el número de plántulas (figura 38).



Figura 37. Comparación de crecimiento de frijol ayocote al noveno día de siembra

A	B	C	D	E	F	G	H	I
0 min	0.5 min	1 min	3 min	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min

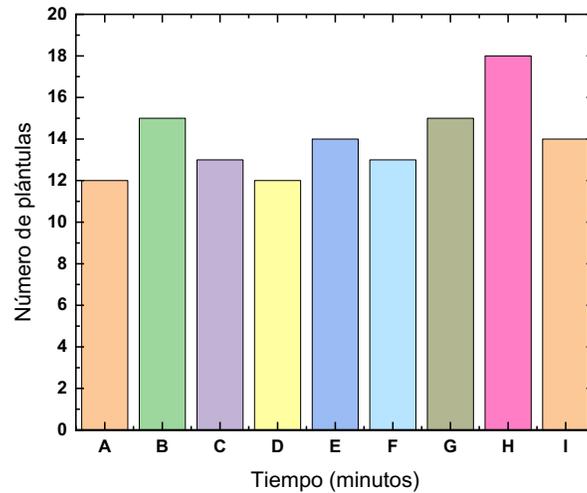


Figura 38. Gráfica del número de plántulas al cuarto día de haber germinado

10 de octubre del 2022.

El crecimiento acelerado que tuvieron las plantas con el tratamiento de 20 min solo fue muy significativo en los primeros estadios de la germinación, puesto que para este punto las plantas comenzaron a tener un tamaño más estable. Pero aún así el tratamiento de 20 minutos siguió teniendo un mayor tamaño de la planta, tamaño de hojas y grosor del tallo en comparación con los demás. Otro tratamiento que destaca detrás del de 20 minutos es el tratamiento de 30 minutos (figura 39). Debido al alto desarrollo de las plantas, se dificultó un poco comparar el crecimiento, para este punto se consideró trasplantar a macetas.



Figura 39. Comparación de crecimiento del frijol ayocote al doceavo día de siembra.

Los resultados obtenidos concuerdan con las investigaciones realizadas por (Liu et al., 2019) y (Zhou et al., 2019), en el que mediante la aplicación de plasma no térmico a semillas de frijol mungo, se determinaron efectos positivos en relación al tamaño de planta, grosor del tallo, y tamaño de las hojas, así como efecto de esterilización para evitar el contacto con el patógeno y bacterias.

Para demostrar que este proceso se puede aplicar en cualquier tipo de agua, se trató el agua del laboratorio de la Escuela de Estudios Superiores de Xalostoc y se hizo el análisis fisicoquímico correspondiente de pH, temperatura, conductividad eléctrica, TDS y salinidad en la cual, los resultados tienden al mismo comportamiento siendo semejantes a los de la tabla 5 del agua tratada del área de Apatlaco. Los resultados se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Parámetros fisicoquímicos obtenidos del agua de laboratorio de la EESX

Muestra	Tiempo (min)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad eléctrica (µS)	Total de sólidos disueltos (ppm)	Salinidad (ppt)
Testigo	0	6.69	27.4	624	528	0.37
1	0.5	7.70	28.3	682	575	0.40
2	1	7.61	29.2	715	593	0.42
3	3	7.44	31.8	735	600	0.42
4	5	7.33	36.7	756	606	0.43
5	10	6.97	41.4	759	587	0.41
6	15	6.85	44.8	781	595	0.42
7	20	4.25	46.2	880	690	0.48
8	30	3.12	48.4	942	751	0.53

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

En el presente trabajo de investigación se reportaron y analizaron los resultados fisicoquímicos sobre el agua activada por plasma con una descarga directa.

Se lograron cumplir de manera exitosa los objetivos planteados al principio de esta investigación. Caracterizando las propiedades fisicoquímicas del agua activada por plasma, dentro de las cuales se destaca que el pH disminuye y la conductividad eléctrica aumenta gradualmente, siendo los tratamientos de 15, 20 y 30 minutos los más significativos.

Las concentraciones de nitratos aumentaron en todos los tiempos de tratamiento, el crecimiento de los tratamientos de 20 y 30 minutos fueron los más notables. Sin embargo, se nota una inestabilidad en la concentración de los nitritos debido al medio ácido en el que se encuentra, por lo tanto, su concentración es menor en comparación a la de los nitratos.

En la concentración de H_2O_2 también se observa un aumento en todos los tiempos de exposición teniendo un gran contraste con el control de 0.2 mg/L, con el tiempo de tratamiento de 30 minutos cuyo valor fue de 14.6mg/L.

Las semillas regadas con agua activada por plasma germinaron en un período de 5 días, en la comparación de su crecimiento el tratamiento más notable fue el de 20 minutos, donde se reportó mayor número de germinación de semillas, un crecimiento acelerado de la planta, presentando mejores características en comparación a los demás tratamientos y al testigo. Siendo el tratamiento de 20 minutos el óptimo para el frijol ayocote morado.

A partir de distintas consultas bibliográficas y los resultados obtenidos en este estudio se puede concluir que las propiedades físicas y químicas de AAP son las responsables de estimular la germinación de las semillas, además de promover el desarrollo de la planta y aumentar la calidad de los cultivos, pudiendo ser considerado como una alternativa ecológica que garantice la seguridad alimentaria para la humanidad.

5.2. Recomendaciones

Esta rama de estudio del plasma aún sigue estando en constante estudio y análisis, debido a que es una tecnología novedosa y de alto interés en la ciencia. Sin embargo, los estudios realizados son de otros países y el desarrollo de este tema actualmente se encuentra muy limitado en México, por lo que se sugiere que los esfuerzos futuros deben centrarse en la continua investigación de este tema para el desarrollo de las distintas aplicaciones del AAP, el cual se tiene la confianza de que pueda ayudar a enfrentar los retos de problemas mundiales venideros.

CAPÍTULO VI

Literatura citada

- Ball, P. (2008). Water as an active constituent in cell biology. *Chem Rev.* 108(1):74-108.
- Bazaka, K.; Jacob, M.V.; Crawford, R.J.; Ivanova, E.P. (2011). Plasma-assisted surface modification of organic biopolymers to prevent bacterial attachment, *Acta Biomaterialia.* (7) 2015-2028.
- Bravo, S. (2001). *Plasma En Todas Partes.* México: La Ciencia/2 Ed.
- Brenes, R.; Rojas, Lf. (2005). *El Agua: Sus Propiedades Y Su Importancia Biológica.* Acta Académica.
- Burns, R. A. (2003). *Fundamentos de Química* (1a. Ed.). Mexico: Pearson Educacion.
- Carbajal A, GONZÁLEZ M. (2003). Funciones biológicas del agua en relación con sus características físicas y químicas. En: «Agua. El arte del buen comer». 249-256. Academia Española de Gastronomía. Barcelona.
- Chen, C.; Liu, C. C.; Jiang, A. L.; Guan, Q. X.; Sun, X. Y.; Liu, S. S.; Hao, K. X.; Hu, W. Z. (2019). The effects of cold plasma activated water treatment on the microbial growth and antioxidant properties of fresh-cut pears. *Food and Bioprocess Technology*, 12(11), 1842–1851.
- Chen, Francis F. (1984). *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion.* 2 Ed, Plenum Press, New York.
- Choi, E. J.; Park, H. W.; Kim, S. B.; Ryu, S.; Lim, J.; Hong, E. J.; Byeon, Y. S.; Chun, H. H. (2019). Sequential application of plasma activated water and mild heating improves microbiological quality of ready to-use shredded salted kimchi cabbage (*Brassica pekinensis* L.). *Food Control*, 98, 501–509.
- Clemente-Carazo, M.; Borroug, S.; Bourke, P. Inactivación de *Salmonella typhimurium* por la aplicación de agua activada por plasma frío. En: *Proceedings of the 9th Workshop on Agri-Food Research for young researchers. WIA.2020.* Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena, 2021. Pp. 12-15. ISBN: 978-84-17853-29-7.
- Fernández-Gómez, P.; Alvarez-Ordóñez, A.; López, M.; Prieto, M.; Walsh, J. L.; Sivertsvik, M.; Noriega Fernández, E. (2020). Plasma Activated Water: a novel biocontrol strategy

towards *Listeria monocytogenes* biofilms. EFFoST Annual Meeting, bridging high-tech food-tech and health: consumer-oriented innovations. Communication P.T1.016. Food Science and Technology, 126, 109336.

Fravel, D.; Olivain, C.; Alabouvette, C. (2003). *Fusarium oxysporum* and Its Biocontrol. *New Phytologist*, 157, 493-502.

Gracy, R.; Gupta, V.; Mahendran. (2019). Effect of plasma activated water (PAW) on chlorpyrifos reduction in tomatoes. *International Journal of Chemical Studies*, 7(3), 5000–5006.

Guadamuz, S. (2013) Plasma, ¿Qué es y para qué se utiliza?. *Características del plasma*. 7.

Guo, J.; Huang, K.; Wang, X.; Lyu, C.; Yang, N.; Li, Y.; Wang, J. (2017). Inactivation of yeast on grapes by plasma-activated water and its effects on quality attributes. *Journal of Food Protection*, 80(2), 225–230.

Inguglia, E. S.; Oliveira, M.; Burgess, C. M.; Kerry, J. P.; Tiwari, B. K. (2020). Plasma-activated water as an alternative nitrite source for the curing of beef jerky: Influence on quality and inactivation of *Listeria innocua*. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 59, 102276.

Joshi, I.; Salvi, D.; Schaffner, D. W.; Karwe, M. V. (2018). Characterization of microbial inactivation using plasma-activated water and plasma-activated acidified buffer. *Journal of Food Protection*, 81(9), 1472–1480.

Jung, S.; Kim, H.J.; Park, S.; Yong, H. I.; Choe, J. H.; Jeon, H. J.; Choe, W.; Jo, C. (2015). The use of atmospheric pressure plasma-treated water as a source of nitrite for emulsion-type sausage. *Meat Science*, 108, 132–137.

Kang, C.; Xiang, Q.; Zhao, D.; Wang, W.; Niu, L.; Bai, Y. (2019). Inactivation of *Pseudomonas deceptionensis* CM2 on chicken breasts using plasma-activated water. *Journal of Food Science and Technology*, 56(11), 4938–4945.

Khamsen, N.; Onwimol, D.; Teerakawanich, N.; Dechanupaprittha, S.; Kanokbannakorn, W.; Hongesombut, K.; Srisonphan, S. (2016). Esterilización de semillas de arroz *Oryza sativa* L. y mejora de la germinación a través de plasma de descarga no térmica híbrido atmosférico. *ACS Appl Mater Interfaces*. 8 30, 19268-75.

Khan, M. S. I.; Kim, Y. J. (2019). Inactivation mechanism of *Salmonella Typhimurium* on the surface of lettuce and physicochemical quality assessment of samples treated by microplasma discharged water. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 52, 17–24.

- Lin, C. M.; Chu, Y. C.; Hsiao, C. P.; Wu, J. S.; Hsieh, C. W.; Hou, C. Y. (2019). The optimization of plasma-activated water treatments to inactivate *Salmonella Enteritidis* (ATCC 13076) on shell eggs. *Foods*, 8(10), 520.
- Liu, B.; Honnorat, B.; Yang, H.; Arancibia, J.; Rajjou, L.; Rousseau, A. (2019). Non-thermal DBD plasma array on seed germination of different plant species. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 52(2), 025401.
- Liu, C.; Chen, C.; Jiang, A.; Sun, X.; Guan, Q.; Hu, W. (2020). Effects of plasma-activated water on microbial growth and storage quality of fresh-cut apple. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 59, 102256.
- López, M.; Calvo, T.; Prieto, M.; Múgica-Vidal, R.; Muro-Fraguas, I.; Alba-Elías, F.; Alvarez-Ordóñez, A. (2019). A review on non-thermal atmospheric plasma for food preservation: mode of action, determinants of effectiveness and applications. *Frontiers in Microbiology*, 10, 622.
- Lu, X.; Naidis, G.; Laroussi, M.; Ostrikov, K. (2014). *Phys. Rep.*, 540 123-166.
- Lukes, P., Clupek, M., Babicky, V., & Sunka, P. (2008). Ultraviolet radiation from the pulsed corona discharge in water. *Plasma Sources Science and Technology*.
- Lukes, P., Locke, B. R., & Brisset, J.-L. (2012). Aqueous-phase chemistry of electrical discharge plasma in water and in gas-liquid environments. *Plasma Chemistry and Catalysis in Gases and Liquids*, 1, 243–308.
- Ma, R.; Wang, G.; Tian, Y.; Wang, K.; Zhang, J.; Fang, J. (2015). Non-thermal plasma-activated water inactivation of food-borne pathogen on fresh produce. *Journal of Hazardous Materials*, 300, 643–651.
- Ma, R.; Yu, S.; Tian, Y.; Wang, K. L.; Sun, C. D.; Li, X.; Zhang, J.; Chen, k. S.; Fang, J. (2016). Effect of non-thermal plasma-activated water on fruit decay and quality in postharvest Chinese bayberries. *Food and Bioprocess Technology*, 9(11), 1825–1834.
- Machado-Moreira, B.; Tiwari, B. K.; Richards, K. G.; Abram, F.; Burgess, C. M. (2021). Application of plasma activated water for decontamination of alfalfa and mung bean seeds. *Food Microbiology*, 96, 103708.
- Marschner, H. (2011) *Mineral nutrition of higher plants*, Academic press.
- Martínez, R.; Rodríguez, J.; Sánchez, L. (2007) *Química, Un Proyecto De La American Chemical Society*, Ed. Reverte.
- McPherson, L.L. (1993). Understanding ORP's in the disinfection process. *Water Engineering and Management*, 140, 29–31.

- Milántiev, V.; Temkó, S. (1983). Física del plasma. Mir Moscú. 6.
- Monaco, T.; MacKown, T.; Johnson, D.A.; Jones, T.; Norton, J.; Redinbaugh, M. (2003). Journal of Range Management, 646-653.
- Nandkumar, N. (2014) Plasma-The fourth state of matter. Int. J. Sci. Technol. Res. 3, 49–52.
- Oehmigen, K.; Hähnel, M.; Brandenburg, R.; Wilke, Ch.; Weltmann, K-D.; Woedtke, Th. (2010). The Role of Acidification for Antimicrobial Activity of Atmospheric Pressure Plasma in Liquids. 7. Plasma Processes and Polymers.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2021). El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2021. Recuperado de: <https://www.fao.org/state-of-food-security-nutrition/2021/en/>.
- Pacheco, J. (2009). El plasma, ese universo de todos tan desconocido. Contacto nuclear, pp. 3.
- Peón, J. (2007). El agua, una sustancia tan común como sorprendente. 19-21.
- Pérez-Fernández, M.; Calvo-Magro, E.; Montanero- Fernández, J.; Oyola-elasco, J. (2006). Environ. Biol. 27.
- Qian, J.; Zhuang, H.; Nasiru, M. M.; Muhammad, U.; Zhang, J.; Yan, W. (2019). Action of plasma-activated lactic acid on the inactivation of inoculated Salmonella Enteritidis and quality of beef. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 57, 102196.
- Raybaudi-Massilia, RM.; Mosqueda-Melgar, J., Soliva-Fortuny, R., Martin-Belloso, O. (2009). Control de microorganismos patógenos y de deterioro en frutas recién cortadas y jugos de frutas por métodos tradicionales y antimicrobianos naturales alternativos. Compr. Rev. Food Sci. Food Saf. 8, 157-180.
- Royintarat, T.; Choi, E. H.; Boonyawan, D.; Seesuriyachan, P.; Wattanutchariya, W. (2020). Chemical-free and synergistic interaction of ultrasound combined with plasma-activated water (PAW) to enhance microbial inactivation in chicken meat and skin. Scientific Reports, 10(1), 1–14.
- Sanchez, F. (2018). Recuperado de Ciencia Mx: <https://www.cienciamx.com/index.php/tecnologia/biotecnologia/24759-plasma-produccion-alimentos -mexico>.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (24 de septiembre de 2020). México, cuna de semillas para el campo. Recuperado de: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/mexico-cuna-de-semillas-para-el>.

- Xiang, Q.; Zhang, R.; Fan, L.; Ma, Y.; Wu, D.; Li, K.; Bai, Y. (2020). Microbial inactivation and quality of grapes treated by plasma activated water combined with mild heat.
- Yan, D.; Sherman, J.H.; Keidar, M. (2017). Cold atmospheric plasma, a novel promising anti-cancer treatment modality. *Oncotarget*, 8 15977.
- Yan, Y.; Feng, L.; Shi, M.; Cui, C.; Liu, Y. (2020). Effect of plasma-activated water on the structure and in vitro digestibility of waxy and normal maize starches during heat-moisture treatment. *Food Chemistry*, 306, 125589.
- Yong, H. I.; Park, J.; Kim, H. J.; Jung, S.; Park, S.; Lee, H. J.; Choe, W.; Jo, C. (2017). An innovative curing process with plasma-treated water for production of loin ham and for its quality and safety. *Plasma Processes and Polymers*, 15(2).
- Zhang, Q., Liang, Y. D., Feng, H. Q., Ma, R. N., Tian, Y., Zhang, J., & Fang, J. (2013). A study of oxidative stress induced by non-thermal plasma-activated water for bacterial damage. *Applied Physics Letters*, 10.
- Zhang, S.; Rousseau, A.; Dufour, T. (2017). Promoting lentil germination and stem growth by plasma activated tap water, demineralized water, and liquid fertilizer. *RSC Advances*, 7, 31244-31251.
- Zhao, Y.; Chen, R. C.; Liu, D. P.; Wang, W. C.; Niu, J. H.; Yang, X.; Qi, Z. H.; Zao, Z. G. Y.; Song, Y. (2019). Effect of nonthermal plasma-activated water on quality and antioxidant activity of fresh-cut kiwifruit. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 47(11), 4811–4817.
- Zhao, Y.; Chen, R.; Tian, E.; Liu, D.; Niu, J.; Wang, W.; Qi, Z.; Xi, Y.; Song, Y.; Zhao, Z. (2020). Plasma-activated water treatment of fresh beef: Bacterial inactivation and effects on quality attributes. *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences*, 4(1), 113–120.
- Zheng, Y.; Wu, S.; Dang, J.; Wang, S.; Liu, Z.; Fang, J.; Liu, Z.; Fang, J.; Han, P.; Zhang, J. (2019). Reduction of phoxim pesticide residues from grapes by atmospheric pressure non-thermal air plasma activated water. *Journal of Hazardous Materials*, 377, 98–105.
- Zhou, R. W.; Li, J. W.; Zhou, R. S.; Zhang, X. H.; Yang, S. Z. (2019). Atmospheric-pressure plasma treated water for seed germination and seedling growth of mung bean and its sterilization effect on mung bean sprouts. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 53, 36–44.
- Zhou, R.; Zhang, X.; Bi, Z.; Zong, Z.; Niu, J.; Song, Y.; Liu, D.; Yang, S. (2015). *Appl. Environ. Microbiol.* 81,5257- 5265.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Ayala, Morelos a 3 de mayo de 2023

Asunto: Voto Aprobatorio

DR. GREGORIO BAHENA DELGADO
DIRECTOR DE LA EESX
P R E S E N T E

Por medio del presente, los revisores de la tesis que lleva por título: "**Análisis de propiedades fisicoquímicas del agua activada por plasma y su aplicación en la agricultura**". Que ha realizado la pasante de la Licenciatura en **Ingeniería Química, Jocelyn Celestino Vázquez**, otorgamos nuestro voto de aprobación para su impresión por haberse realizado las correcciones consideradas pertinentes de nuestra parte.

Atentamente
Por una humanidad culta
Una universidad de excelencia

Dr. César Torres Segundo

Dr. Esteban Montiel Palacios

Dra. María del Carmen Fuentes Albarrán

Dr. Fidel Benjamín Alarcón Hernández

Dr. José Luis Gadea Pacheco



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

CESAR TORRES SEGUNDO | Fecha:2023-05-03 20:32:20 | Firmante

exQjP6FnPO3rko3ZNwCyGQiTrh0+UzoF9PT+5ZARIYdmlkvs0+HfulRwgpPepFpoWC290n4wPZHh1ehiloyKvafURU1x+Vx0wLnqfOIVObvOauYQNqv5EzcccdGdNo2hWL0q8OHIsfJ67mCeXqjvzcol3rsmPjxOY/HHSBSm7AtXvqjWd+xliv4WaNivzXI7BJHDpX7x4gh581TOSddzA2da8rpKK8vNGdxnPxD91hndbyia/PgaHriv+GvKPr+/CSXSfEacBfJpKWHL5OZhuUWmDkmA/yXyoHCa3TKlhmST23sOxrse9PTTKM6YUKH+yrYqmrORjhJ1Xfzl4U8JIA==

FIDEL BENJAMIN ALARCON HERNANDEZ | Fecha:2023-05-04 08:34:24 | Firmante

wr0nOhsYTrb/mROI84iN3rSzt0T1o2uyIW2F3pjX9zfxWz09zyho1AWjGAIBmVhHve94Aqd1AIBW6+Wiqcft+Ekyzg/6Pe4B6rb/mZk9m8BWuoXeJwhWy+3j/Nq0sEhKogxBhspMINf0e3A+X0sDW9+3ZS2sXNi9aCpXuc9rvCtmCLXEdwyDc3eex38QrEGBmuZQwPpdZM17KfuE5VKlfjM7+IXyvOvFKIGfTSarmogcQZFXeyZ8PHmHqTCaw5ESxNXULKAc5xGI1DBI3s8skVgEaFRhe8hoYGHFWMOnFEyMb4sLh9dUKkteE6pXS5c7QFfuJIP6exjUOUSCP7nkg==

JOSE LUIS GADEA PACHECO | Fecha:2023-05-08 15:49:07 | Firmante

KdBG8ch5j1uBxBacdBPz6ZG3XPEAHwUKb1QQOtCs9Cadx9Yoko8xzSpO+VAP0p8wnY8jP3uv4GUZsjaO6yxZ2rgW935aQRKnA8j4OQDAHg3+lyuifjKXHW0Mq1z2IjdQxzIFluolEyzomzEzY5+17LAog4xXPQZKbQyWEw0jSoVuc9lw/15tIUU07V/CuG3QrM9Vv/V6TpCyfLgqel6azTOC0jh2tNLywgPHiarT1wydzYFNw+Nof7oONbwKH0yYJotBgR76s5n4ObHI0FTNj8IDG+K5stHW4J1+5tfSj/TgCf1AgEKYLqapqjVu8kXOGr6fKJO7esz4453Am8BBMA==

ESTEBAN MONTIEL PALACIOS | Fecha:2023-05-08 22:42:11 | Firmante

dPxDjHNyUGXFqceWEdCPUmntUaU0GJmexluMXynzWz0LSJjgfoBHA+SKQCBrbvAqjkCNFbZK6eqhvsfcfJwbwXBCX6fvFIOyD/Yqf/rvgkna0Zly7I6N5TsO0rm3Q+SIJLvc5KuzbZd6GpFj3UaLahLymEu+yNBYY0dBEo7Qq3+bOqnVA/FsH3ghlg0NvobgNO9bNtDDpdOmP/QeKRfzSX88SoyG5TfyM6OEaA19c9zxkgQ6wsJQ/KvxgUbsYIWXdypZ81exLCiNx/QWt3lpZ7OMdr9xTUI3/FEI73c+EYMeRlqPJHsJupLVB8z199YjWt6tKd5wvgYPNnmk0GOlw==

MARIA DEL CARMEN FUENTES ALBARRAN | Fecha:2023-05-17 14:43:34 | Firmante

YUbkRepc7Ji799WI6CSMEp2s6//OogMCojThnITGRgCwJuS7iS/b2Hcevn+mbJbcNYQdtO+SsXyInzeanz05LDLroZse+qEr7WidQfP17ftuTJN5YY2zfxDQOPkwA5oZLGE3axG0UDXK6HM8e/Y5lhqrS6c29GENcZrygzQylcuBzn7Ef8hhd0+8nwVL7Wg9k9qbbMIWxwh07AGa0Ft5/XAI0Ph0t+cZAH19i8vYtbN04T6V19SFeFSkhwH0uVrcCPtdUPhctJde8GuDWcUtZyTXe8DGVzysu8ffR+rsZDO22j7QQmBTDOHBmyA7TMJbDnp6u7ILPeK/mCAu/TGQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



sDeNoMntr

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/BrnhzMt68mGkIIewDKHcq7mhvRNvfw4>

