



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO



DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA
INSTITUTO DE HORTICULTURA

**RELACIONES Ca/Mg/K Y SOLUCIÓN NUTRITIVA MAGNETIZADA
EN LA PRODUCCIÓN DE ARÁNDANO (*Vaccinium* spp.) CV.
BILOXI BAJO CONDICIONES DE HIDROPONIA.**

TESIS PROFESIONAL

Como requisito parcial para obtener el grado de:
MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

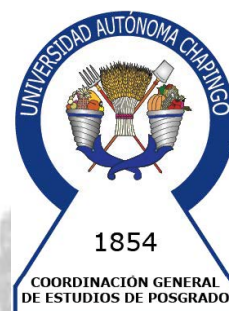
Presenta:

JOSÉ EDUARDO HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ

Bajo la dirección de:

DR. JOEL PINEDA PINEDA

Chapingo, Estado de México, Junio de 2020



APROBADA

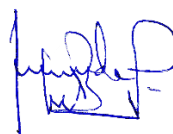


**RELACIONES Ca/Mg/K Y SOLUCIÓN NUTRITIVA MAGNETIZADA EN LA
PRODUCCIÓN DE ARÁNDANO (*Vaccinium* spp.) CV. BILOXI BAJO
CONDICIONES DE HIDROPONIA.**

Tesis realizada por **JOSÉ EDUARDO HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ**, bajo la
dirección del comité asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como
requisito parcial para obtener el grado de:

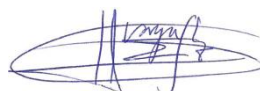
MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

DIRECTOR



DR. JOEL PINEDA PINEDA

ASESOR



DR. MATEO VARGAS HERNÁNDEZ

ASESOR



DR. EDILBERTO AVITIA GARCÍA

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo por brindarme nuevamente la oportunidad de seguir adelante con mis estudios profesionales.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado para la realización de mis estudios de posgrado,

Al Dr. Joel Pineda Pineda por darme la oportunidad de trabajar dentro de sus líneas de investigación y proporcionar el apoyo necesario a través de infraestructura física, humana y económica.

A los compañeros Carlos Heladio Rivera Luna y Germán Isidro Gutiérrez Molina de la Universidad Autónoma de Sinaloa, José Luis Ruiz Vázquez y Elen Ortiz Rodríguez de la Universidad Politécnica de Tlaxcala Región Poniente, por todo el apoyo técnico prestado durante el desarrollo del experimento y a quienes les tengo un profundo agradecimiento por hacer posible este proyecto de investigación.

DATOS BIOGRÁFICOS

José Eduardo Hernández Hernández nació el 26 de diciembre de 1991 en Tlaltecátla, localidad perteneciente al municipio de Xochiatipan en el estado de Hidalgo. Realizó sus estudios de primaria en diferentes escuelas debido al cambio continuo de residencia. Posteriormente estudió en la Secundaria Rafael Ramírez en la comunidad Plan de Palmar, Papantla de Olarte, Veracruz. Los estudios de nivel medio y superior los efectuó en la Universidad Autónoma Chapingo, egresando en 2015 como Ingeniero Agrónomo Especialista en Suelos. En los años 2016 y 2017 trabajó como técnico en la Componente Riego por Gravedad Tecnificado (RIGRAT) del Programa de Apoyo a la Infraestructura Hidroagrícola de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), desarrollando trabajos de implantación, seguimiento y evaluación en los módulos de riego II-1 y II-2 del Distrito de Riego 026, Bajo Río San Juan, Tamaulipas. En 2018 ingresó al Instituto de Horticultura para cursar sus estudios de posgrado en la Maestría en Ciencias en Horticultura.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE CUADROS.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
RESUMEN GENERAL	vi
GENERAL ABSTRACT	vii
CAPITULO I. GENERALIDADES.....	1
1.1. Introducción general	1
1.2. El cultivo de arándano	3
1.2.1. Introducción	3
1.2.2. Producción mundial y nacional	3
1.2.3. Origen, historia y distribución.....	4
1.2.4. Taxonomía	5
1.2.5. Variedades y cultivares de importancia.....	5
Cultivar Biloxi	6
1.2.6. Descripción botánica	6
Raíces.....	6
Tallos	6
Hojas.....	7
Yemas vegetativas.....	7
Yemas florales	7
Flores e inflorescencia	7
Fruto	7
1.2.7. Requerimientos del cultivo.....	8
Clima.....	8
Suelo.....	8
Necesidades hídricas.....	9
Necesidades nutrimentales	9
1.2.8. Manejo.....	10
Propagación.....	10
Poda y formación	10
Labores culturales.....	11
Cosecha.....	11
Almacenamiento	12
1.2.9. Macro y micronutrientes en arándano.....	13
Nitrógeno	13

Fósforo.....	13
Potasio.....	14
Calcio.....	15
Magnesio	16
Azufre	17
Hierro	17
Manganeso	18
Cobre	19
Zinc.....	19
Boro	19
1.2.10. Dinámica nutrimental de suelos ácidos.....	20
1.3. Tratamiento magnético del agua y las soluciones acuosas.....	22
1.3.1. Introducción.....	22
1.3.2. Mecanismo iónico.....	24
Los CM's y el carbonato de calcio en solución.....	25
Los CM's y las soluciones salinas.....	28
1.3.3. Mecanismo de superficie	29
1.3.4. Teorías de interacción entre los CM's y el agua.....	30
Reestructuración de los clústers del agua.....	30
Puentes de hidrógeno y rotores moleculares	31
Altos gradientes de un campo magnético débil: teoría de la formación de un líquido ordenado dinámicamente como polímeros de oxianión (DOLLOP)	34
1.3.5. Efectos de los CM's en las propiedades del agua.....	35
1.3.6. Efectos del agua y soluciones nutritivas magnetizadas en los cultivos	37
1.4. Termodinámica de las soluciones nutritivas.....	42
1.4.1. Introducción.....	42
1.4.2. Solución nutritiva	42
1.4.3. Termodinámica del balance nutrimental de la solución de la rizósfera.....	44
1.5. Literatura citada.....	59
CAPITULO II. ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE LA SOLUCIÓN DE LA RIZÓSFERA EN ARÁNDANO AZUL CV. BILOXI DESARROLLADO EN DISTINTAS RELACIONES Ca/Mg/K Y SOLUCIÓN NUTRITIVA MAGNETIZADA	72
Resumen.....	73
Abstract.....	74
2.1. Introducción.....	75
2.2. Materiales y métodos.....	77
2.2.1. Localización.....	77

2.2.2. Material vegetal y sustrato	77
2.2.3. Tratamientos y diseño experimental	77
2.2.4. Variables evaluadas	78
2.2.5. Análisis de datos	80
2.3. Resultados y discusión	80
2.3.1. Balance catiónico y aniónico, pH y CE de la solución de la rizósfera	80
2.3.2. Balance catiónico de las células radicales	87
2.3.3. Energización y magnetización en las soluciones nutritivas	90
2.4. Conclusiones	95
2.5. Literatura citada	96
CAPÍTULO III. RELACIONES Ca/Mg/K Y SOLUCIÓN NUTRITIVA MAGNETIZADA EN LA PRODUCCIÓN DE ARÁNDANO AZUL (<i>Vaccinium</i> spp.) CV. BILOXI BAJO CONDICIONES DE HIDROPONIA	100
Resumen	101
Abstract	102
3.1. Introducción	103
3.2. Materiales y métodos	105
3.2.1. Localización	105
3.2.2. Tratamientos y diseño experimental	105
3.2.3. Variables evaluadas	106
3.2.4. Análisis de datos	110
3.3. Resultados y discusión	111
3.3.1. Pigmentos fotosintéticos	111
3.3.2. Concentraciones de nutrimentos	113
3.3.3. Calidad y rendimiento del fruto	122
3.4. Conclusiones	127
3.5. Literatura citada	128

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.4.1. Coeficientes de actividad a distintas fuerzas iónicas.....	49
Cuadro 1.4.2. Susceptibilidad magnética de elementos y compuestos inorgánicos.	57
Cuadro 2.3.1. Análisis de varianza y comparación de medias de las concentraciones catiónicas relativas de la solución de la rizósfera en plantas de arándano cv. Biloxi desarrolladas en seis soluciones nutritivas de distintas relaciones Ca/Mg/K.....	82
Cuadro 2.3.2. Balances Ca/Mg/K/NH ₄ de las soluciones nutritivas empleadas y de la condición nutrimental óptima para arándano cv. Biloxi.....	83
Cuadro 2.3.3. Análisis de varianza y comparación de medias de las relaciones NO ₃ /NH ₄ , NO ₃ /H ₂ PO ₄ , pH y CE de la solución de la rizósfera en plantas de arándano cv. Biloxi desarrolladas en seis soluciones nutritivas de distintas relaciones Ca/Mg/K.....	86
Cuadro 2.3.4. Análisis de varianza y comparación de medias de las actividades catiónicas relativas de las células radicales fisiológicamente activas en plantas de arándano cv. Biloxi desarrolladas en seis soluciones nutritivas de distintas relaciones Ca/Mg/K.....	88
Cuadro 2.3.5. Balance catiónico promedio de las células radicales fisiológicamente activas en arándano cv. Biloxi desarrollado en seis soluciones nutritivas de distintas relaciones Ca/Mg/K.....	89
Cuadro 2.3.6. Análisis de varianza y contrastes de la energía libre catiónica de las soluciones nutritivas aplicadas a plantas de arándano cv. Biloxi con y sin tratamiento magnético.....	91
Cuadro 2.3.7. Análisis de varianza y contrastes de la susceptibilidad magnética catiónica de las soluciones nutritivas aplicadas a plantas de arándano cv. Biloxi con y sin tratamiento magnético.	92
Cuadro 3.3.1. Pigmentos fotosintéticos en plantas de arándano cv. Biloxi desarrollado en seis soluciones nutritivas de distintas relaciones Ca/Mg/K con y sin tratamiento magnético.....	112
Cuadro 3.3.2. Concentraciones de macronutrientes en raíz de plantas de arándano cv. Biloxi desarrolladas en seis soluciones nutritivas de distintas relaciones Ca/Mg/K con y sin tratamiento magnético.	115
Cuadro 3.3.3. Concentraciones de macronutrientes en hoja de plantas de arándano cv. Biloxi desarrolladas en seis soluciones nutritivas de distintas relaciones Ca/Mg/K con y sin tratamiento magnético.	116
Cuadro 3.3.4. Concentraciones de macronutrientes en fruto de plantas de arándano cv. Biloxi desarrolladas en seis soluciones nutritivas de distintas relaciones Ca/Mg/K con y sin tratamiento magnético.	117
Cuadro 3.3.5. Concentraciones de micronutrientes en raíz en plantas de arándano cv. Biloxi desarrolladas en seis soluciones nutritivas de distintas relaciones Ca/Mg/K con y sin tratamiento magnético.	118
Cuadro 3.3.6. Concentraciones de micronutrientes en hoja de plantas de arándano cv. Biloxi desarrolladas en seis soluciones nutritivas de distintas relaciones Ca/Mg/K con y sin tratamiento magnético.	119

Cuadro 3.3.7. Concentraciones de micronutrientes en fruto de plantas de arándano cv. Biloxi desarrolladas en seis soluciones nutritivas de distintas relaciones Ca/Mg/K con y sin tratamiento magnético.	120
Cuadro 3.3.8. Calidad del fruto en arándanos cv. Biloxi desarrollados en seis soluciones nutritivas de distintas relaciones Ca/Mg/K con y sin tratamiento magnético.	124
Cuadro 3.3.9. Rendimiento en función del diámetro de fruto en plantas de arándano cv. Biloxi desarrolladas en seis soluciones nutritivas de distintas relaciones Ca/Mg/K con y sin tratamiento magnético.	125

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.3.1. Balances Ca/Mg/K/NH ₄ de las soluciones nutritivas y de la condición nutrimental óptima para arándano cv. Biloxi desarrollado en seis soluciones nutritivas de distintas relaciones Ca/Mg/K.	83
Figura 2.3.2. Deficiencia de Mg en hojas basales en plantas de arándano cv. Biloxi desarrolladas en seis soluciones nutritivas de distintas relaciones Ca/Mg/K. Las muestras foliares se extrajeron de distintas unidades experimentales.	84

RESUMEN GENERAL

RELACIONES Ca/Mg/K Y SOLUCIÓN NUTRITIVA MAGNETIZADA EN LA PRODUCCIÓN DE ARÁNDANO (*Vaccinium* spp.) CV. BILOXI BAJO CONDICIONES DE HIDROPONIA

El arándano es uno de los cultivos de gran relevancia económica en México debido a su alta rentabilidad, sin embargo, la información pública sobre sus características fisiológicas y nutrimentales es deficiente lo que ha limitado su productividad. El propósito del presente trabajo fue generar información acerca del uso de concentraciones descendentes de calcio y campos magnéticos en las soluciones nutritivas (SN's) en arándano cv. Biloxi. Se utilizó un diseño bifactorial 2x6 formado por la combinación de dos niveles de magnetización 0 y 350 mT, y seis concentraciones descendentes de calcio definidas por la relación Ca/Mg/K: 40.0/21.8/38.2, 35.0/23.6/41.4, 30.0/25.4/44.6, 25.0/27.2/47.8, 20.0/29.0/51.0 y 15.0/30.8/54.2. El experimento se desarrolló de noviembre 2018 a noviembre de 2019, periodo en el que se evaluó el efecto sobre el balance catiónico y aniónico de la solución en la rizósfera, clorofilas a, b y total, carotenoides, concentraciones nutrimentales en raíz, hoja y fruto, calidad (pH, CE, antocianinas y sólidos solubles totales, SST) y rendimiento de fruto. Los resultados demostraron estadísticamente que las plantas realizaron ajustes al balance catiónico y aniónico de la solución en la rizósfera independientemente de los balances establecidos en las SN's. Niveles bajos de calcio en las soluciones aumentaron significativamente las concentraciones de N, K, Mg y B en hoja, P y Zn en fruto, y disminuyeron el contenido de Zn en raíz; asimismo, la solución con la concentración mínima de calcio produjo la mayor producción de frutos con calidad suprema y de primera. Altas concentraciones de calcio incrementaron el nivel de acidez, antocianinas y SST en fruto. Los efectos fueron menos evidentes en las clorofilas a, b y total, carotenoides, y en la CE del fruto. Las respuestas al factor magnético fueron distintos en cada nivel de calcio evaluado, lo que no permitió precisar efectos específicos.

Palabras clave: arándano, soluciones nutritivas, calcio, campos magnéticos,

GENERAL ABSTRACT

Ca/Mg/K RATIOS AND MAGNETIZED NUTRIENT SOLUTION IN THE PRODUCTION OF BLUEBERRY (*Vaccinium* spp.) CV. BILOXI UNDER HYDROPONIC CONDITIONS

Blueberry is one of the crops of great economic relevance in Mexico due to its high profitability, however, public information about physiological and nutritional blueberry characteristics is deficient, which has limited its productivity. The purpose of this work was to generate information on the use of descending calcium concentrations and magnetic fields in nutrient solutions (NS's) in blueberry cv. Biloxi. A bifactorial design 2x6 was formed, it consisted in the combination of two levels of magnetization, 0 and 350 mT, and six calcium descending concentrations established through Ca/Mg/K ratio: 40.0/21.8/38.2, 35.0/23.6/41.4, 30.0/25.4/44.6, 25.0/27.2/47.8, 20.0/29.0/51.0 and 15.0/30.8/54.2, resulting 12 treatments. The experiment was conducted from November 2018 to November 2019, a period in which the effect on the cationic and anionic balance of the solution was evaluated in the rhizosphere; chlorophylls a, b and total, carotenoids, nutritional concentrations in root, leaf and fruit; quality (pH, CE, anthocyanins and total soluble solids, SST) and fruit yields. The results statistically demonstrated that the plants made adjustments to the cationic and anionic balance of the solution in the rhizosphere regardless of the balances established in the NS's. Low calcium levels in solutions significantly increased concentrations of N, K, Mg and B in leaf, P and Zn in fruit, and decreased the root Zn content; in addition, the solution with the minimum calcium concentration produced the highest production of fruits with supreme and first quality. High calcium concentrations increased the level of acidity, anthocyanins and SST in fruit. The effects were less evident on chlorophylls a, b and total, carotenoids, and in the EC of the fruit. Responses to the magnetic factor were different at each calcium level, which did not allow specific effects to be specified.

Keywords: blueberry, nutrient solutions, calcium, magnetic fields

CAPITULO I. GENERALIDADES

1.1. Introducción general

El arándano es uno de los cultivos cuya demanda ha venido creciendo en los últimos años, tanto a nivel nacional como internacional (FAO, 2019; SIAP, 2019), debido a que su fruto es muy valorado por ser una importante fuente de antioxidantes que benefician la salud humana (Campos, 2012), además, su alta rentabilidad ha producido su expansión en una gran diversidad de ambientes en todo el mundo (FIRA, 2016). México figura entre los principales productores de esta frutilla a nivel mundial; en 2019 se posicionó en el 5° lugar con un aporte de 40,251 t (FAO, 2019). Aunque la producción del arándano en México inició en suelo, en la última década su cultivo ha aumentado con el uso de sistemas hidropónicos, un modelo de producción capaz de aumentar la eficiencia del agua y los nutrimentos en los cultivos (Pineda *et al.*, 2008). Sin embargo, pese a la relevancia económica y social que el arándano ha adquirido en el país (Bolaños, 2018), es poca la información pública que existe sobre sus características fisiológicas y nutrimentales lo que ha limitado su productividad.

Los arándanos se han clasificado como plantas calcífugas, debido a que crecen y se desarrollan de manera óptima en suelos ácidos en los que el contenido de calcio es bajo. La adaptación de estas plantas a suelos ácidos, le han conferido ciertas distinciones fisiológicas y nutrimentales con respecto a la mayoría de especies cultivables, las cuales, escasamente han sido sujetas a estudios con propósitos productivos (Retamales y Hancock, 2018; Korcak, 1988). Esto ha vuelto imprescindible el planteamiento de nuevas investigaciones para una comprensión más profunda acerca de estas diferencias y con ello, mejorar el proceso de producción del cultivo, en particular su nutrición.

El presente trabajo tuvo como objetivo formular seis soluciones nutritivas (SN's) con concentraciones descendentes de calcio y evaluar sus efectos sobre el balance catiónico y aniónico de la solución en la rizósfera, clorofilas a, b y total, carotenoides, concentraciones nutrimentales en raíz, hoja y fruto, calidad del fruto (pH, CE, antocianinas y sólidos solubles totales, SST) y rendimiento en plantas de arándano cv.

Biloxi. También se incluyó un estudio sobre el uso de SN's magnetizadas, técnica que tiene la capacidad de estimular procesos bioquímicos y fisiológicos en varias especies vegetales, que se reflejan en aumentos en la biomasa fresca y seca, concentraciones nutrimentales y de algunos metabolitos, actividad enzimática, actividad fotosintética, rendimiento, entre otros (Hachicha *et al.*, 2018; Surendran *et al.*, 2016; Haq *et al.*, 2016; El Sayed y El Sayed, 2014; Grewal y Maheshwari, 2011), y con ello medir los beneficios potenciales del tratamiento magnético de las SN's en arándano bajo condiciones de hidroponia.

La información generada podrá emplearse para formular soluciones nutritivas más equilibradas en arándano que provean en suficiencia y balance los nutrimentos necesarios para un desarrollo óptimo del cultivo, además de hacer un uso más racional y eficiente de los insumos, en particular de los fertilizantes y el agua, que son dos de los factores determinantes más importantes en cualquier sistema de producción, y con ello disminuir efectos negativos residuales en el ambiente.

La investigación se desarrolló en dos etapas. En la primera se evaluaron 12 tratamientos, formados por dos niveles de magnetización (0 y 350 mT) y seis dosis descendentes de calcio definidas por la relación Ca/Mg/K (40.0/21.8/38.2, 35.0/23.6/41.4, 30.0/25.4/44.6, 25.0/27.2/47.8, 20.0/29.0/51.0 y 15.0/30.8/54.2), sobre la solución de la rizósfera en plantas de arándano cv. Biloxi. En la segunda etapa y con los mismos tratamientos se determinaron los efectos en pigmentos fotosintéticos (clorofilas a, b, total y carotenoides), concentraciones nutrimentales en distintos órganos de la planta (raíz, hoja y fruto), calidad del fruto (pH, CE, antocianinas y sólidos solubles totales) y rendimiento en arándano.

1.2. El cultivo de arándano

1.2.1. Introducción

El cultivo de frutillas, se encuentra entre las actividades de mayor rentabilidad en el sector agrícola mexicano y cuenta con una demanda creciente a nivel nacional e internacional. Esta expansión se ha extendido en una gran diversidad de ambientes y ha traído consigo el uso de prácticas culturales innovadoras (FIRA, 2016). Actualmente, México figura entre los mayores productores y exportadores de frutillas del mundo (SIAP, 2019).

El arándano, en su contexto internacional, es la frutilla que más dinamismo ha mostrado en su comercio. Entre los años 2003 y 2012, el volumen de las exportaciones mundiales de arándanos presentó una tasa de crecimiento promedio anual de 10%, siendo los principales países exportadores de arándanos en ese periodo Estados Unidos, Canadá y Polonia (FIRA, 2016). De acuerdo a los datos de la FAO (2019), a partir del año 2014 México comienza a posicionarse como un exportador importante de esta frutilla alcanzando el 4° lugar a nivel mundial, siendo Jalisco, Michoacán y Sinaloa los estados que encabezan el cultivo del arándano, en superficie sembrada y en valor económico (SIAP, 2019).

1.2.2. Producción mundial y nacional

El arándano azul es originario del noreste de Estados Unidos (Jiménez *et al.*, 2005) y pertenece al género *Vaccinium* el cual incluye alrededor de 450 especies que están distribuidas en el mundo (Trehane, 2004). Tres especies son de gran importancia económica: *Vaccinium corymbosum* L. (arándanos tipo highbush; arbustos altos), *Vaccinium angustifolium* L. (arándanos tipo lowbush; arbustos bajos). y el arándano ojo de conejo, *V. ashei* L. La mayor parte de la producción mundial de arándanos proviene del arándano de arbustos altos (Ratnaparkhe, 2007).

A nivel mundial, Estados Unidos de América es el país líder en la producción de arándano. En 2019, el volumen producido por este país fue de aproximadamente 255,050 t, seguido por Canadá con una producción de 164,205 t. En ese mismo año, México figuró como 5° productor mundial de esta frutilla con un aporte de 40,251 t (FAO,

2019). El destino comercial del volumen nacional obtenido, es principalmente Estados Unidos, el cual adquiere 95.4% de la frutilla (SIAP, 2018).

En 2019, a nivel nacional, las principales entidades que destacaron por su aportación a la producción de arándano fueron Jalisco, Sinaloa y Michoacán con un volumen de 18,334, 8,100 y 6,498 t, respectivamente (SIAP, 2019). Estos estados cuentan con regiones de alto potencial en la producción de arándanos donde las variedades cultivadas requieren bajas temperaturas durante un periodo variable, siendo noviembre y diciembre los principales meses en los que se obtiene el máximo volumen de cosecha (temporada fría) con una producción promedio del 11.7 y 20.5%, respectivamente (SIAP, 2018).

1.2.3. Origen, historia y distribución

Los arándanos azules son originarios de la parte Este de Norteamérica, su cultivo como producto agrícola empezó en Estados Unidos, país que se mantiene como el principal productor y consumidor. Es un frutal arbustivo de la familia Ericaceae domesticada a finales del siglo XIX por inmigrantes procedentes de Europa quienes la trasplantaron a campos de Nueva Inglaterra y Florida (Hancock *et al.*, 2008).

Los arándanos del tipo “ojo de conejo” (*Vaccinium ashei* Reade) fueron los primeros en cultivarse a finales de siglo XIX en el Sur de Estados Unidos. La producción del arándano tipo arbustos altos del norte (*V. corymbosum* L.) es un fenómeno del siglo XX originado con la investigación de Coville y White en los comienzos de 1900 (Retamales y Hancock, 2012).

En Norteamérica, durante el periodo de 1910 a 1940, el cultivo del arándano azul se extendió gradualmente a través de Estados Unidos. Fuera de esta región la primera plantación fue hecha en Assen, Holanda en 1923 por Borgesius. En Alemania se introdujo en 1930 por el Dr. Walter Heermann quien también comenzó con el mejoramiento genético y la utilización de técnicas de producción comercial. En 1959, Trehane hizo plantaciones en Reino Unido. Para 1960 y 1970 se realizaron plantaciones de arándano en Australia y Nueva Zelanda, utilizándose principalmente como cultivo de exportación (Retamales y Hancock, 2012).

En los últimos años, con la liberación de cultivares del tipo arbustos altos del sur por la Universidad de Florida, las plantaciones de arándano se extendieron a áreas de latitudes más bajas, como Florida, California, Argentina y Chile (Bañados, 2009).

En México, el arándano se introdujo en la región de Zacatlán, Puebla, en los años 70's. Las primeras plantaciones comerciales de la región fueron reportadas hasta 1993, con una superficie de 175 ha (Martínez, 1996).

En 2003, se introdujeron en Michoacán cultivares de arbustos altos del sur, estableciéndose pequeñas parcelas comerciales a partir del año 2005. Entre los cultivares evaluados en la región se tiene a Misty, Sharpeblue, Star y Biloxi, siendo esta última la de mayor importancia actualmente (Escalera, 2009).

1.2.4. Taxonomía

Los arándanos son miembros de la familia Ericaceae, género *Vaccinium*, subgénero *Cyanococcus*. El género *Vaccinium* agrupa distintos tipos de arándanos, blueberries, cranberries, lingonberries y varias especies silvestres relacionadas. El género es muy diverso, y contiene alrededor de 400 especies. *Vaccinium* es un género de plantas ampliamente distribuido y exhibe un alto nivel de diversidad morfológica (Ratnaparkhe, 2007).

1.2.5. Variedades y cultivares de importancia

La mayor parte de la producción de arándanos proviene de variedades derivadas de *Vaccinium corymbosum* L. (arándanos tipo arbustos altos), *Vaccinium angustifolium* L. (arándanos tipo arbustos bajos) y *Vaccinium ashei* Reade. Las variedades de arbustos altos están subdivididas en tipos del norte o del sur dependiendo de sus necesidades de frío y su resistencia al invierno (Retamales y Hancock, 2012).

Las variedades que mejor se han adaptado por sus requerimientos climáticos en México son los arbustos altos del sur y ojo de conejo (Williamson *et al.*, 2014), siendo los cultivares de mayor importancia Misty, Biloxi, Sharpblue y O'Neal (Retamales y Hancock, 2012).

Cultivar Biloxi

El cultivar Biloxi pertenece a los arbustos altos del sur, desarrollado por el Servicio de Investigación Agrícola de los programas de mejoramiento del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Spiers *et al.*, 2002). Este cultivar es originario de Mississippi. Es un cultivar precoz con requerimientos menores de 500 horas frío, que puede adaptarse a manejos perennes en climas de inviernos frescos (Retamales y Hancock, 2012). Posee un período de producción de 6 meses (noviembre a mayo). Para una densidad de 4,950 plantas·ha⁻¹, el rendimiento potencial en el primer año productivo es de 2,970 kg·ha⁻¹, 5,940 kg·ha⁻¹ para el segundo y 9,900 kg·ha⁻¹ para el tercero (Bernal, 2010).

1.2.6. Descripción botánica

Todas las especies de *Vaccinium* son plantas perennes leñosas. La altura es la característica más distintiva entre los diferentes tipos de arándano. Los arándanos de arbustos bajos crecen en altura en un rango de 0.1 a 0.15 m, los del tipo arbustos altos de 1.8 a 4.0 m y los del tipo ojo de conejo alcanzan hasta 6 m de altura (Retamales y Hancock, 2012).

Raíces

Los arándanos tipo arbustos altos y ojo de conejo tienen dos tipos principales de raíz: raíces gruesas (hasta 11 mm de diámetro) y raíces fibrosas (alrededor de 1 mm de diámetro). El primer tipo de raíces sirven de anclaje para las plantas y su función es de almacenamiento, mientras que el segundo tipo son los principales responsables de la absorción de agua y nutrimentos. Los arándanos no tienen pelos radicales y están colonizadas por endomicorrizas (Retamales y Hancock, 2018).

Tallos

Los arándanos presentan dos tipos de tallos, primarios y secundarios. Los primarios se originan a partir de brotes que se forman en la corona de la planta; a estos tallos también se les conoce como cañas y se vuelven leñosos en la segunda temporada de crecimiento. Los secundarios por otra parte, se desarrollan de brotes formados en los tallos primarios y se caracterizan por ser los tallos productivos (Retamales y Hancock, 2018).

Hojas

Las hojas de arándano son simples, enteras, dentadas y dispuestas alternativamente a lo largo del tallo. Pueden alcanzar 75 mm de longitud y pueden tener pelos finos en el envés (Retamales y Hancock, 2018). El haz puede ser opaco o brillante, rugoso o suave. La forma de las hojas es variable, pueden ser angostas, elípticas u ovaladas (Gough, 1994).

Yemas vegetativas

La yema vegetativa es una estructura pequeña, puntiaguda, de unos 4 mm de largo y contiene un solo ápice en forma de cúpula (Gough, 1994). A partir de ellas se originan los brotes de la siguiente temporada (Bañados, 2009).

Yemas florales

Se ubican en la zona apical de las ramillas. Las yemas florales son de mayor tamaño que las vegetativas. La diferenciación de estas yemas ocurre desde mediados de verano hasta fines de otoño; en algunas variedades y zonas templadas este fenómeno se puede prolongar por más tiempo (Bañados *et al.*, 2007).

Flores e inflorescencia

La inflorescencia del arándano es un racimo. Las corolas son de color blanco o de color rosa y están compuestas de cinco lóbulos fusionados. El pistilo puede ser ligeramente más largo o más corto que la corola. El ovario es inferior y tiene de cuatro a cinco lóculos (Retamales y Hancock, 2018). Hay de 8 a 10 estambres por flor que se insertan en la base de la corola y rodean el estilo (Gough, 1994).

Fruto

El fruto es una baya con muchas semillas, y madura de 2 a 3 meses después de la polinización, dependiendo del cultivar y las condiciones ambientales. El fruto de los arándanos varía de color de azul claro a negro y tiene una capa de cutícula cerosa de aproximadamente 5 mm de espesor (Retamales y Hancock, 2018).

1.2.7. Requerimientos del cultivo

Clima

Los arándanos, al igual que otros frutales necesitan cierta cantidad de horas frío según el cultivar. Bajas temperaturas durante el letargo resultan en un crecimiento vigoroso y floración adecuadas en primavera; mientras que el frío invernal insuficiente retrasa o limita la brotación de las yemas (Valenzuela, 1988). Sus requerimientos de horas frío varían entre 400 y 1100 horas (Austin, 1994; Gough, 1994).

De acuerdo a Trehane (2004), los arándanos de arbustos altos del norte necesitan entre 600 y 1000 horas frío, para los tipos ojo de conejo de 350 a 650 horas frío y para los arbustos altos del sur desde 150 a 650 horas frío. Las variedades tradicionales de arándano no producen satisfactoriamente en zonas con menos de 400 horas frío (Valenzuela, 1988).

Las plantas son más susceptibles a daños por frío en otoño y en primavera. El tejido activo en crecimiento puede ser perjudicado a 2.2 °C y para flores abiertas son letales 0 °C (Gough, 1994).

La fotosíntesis alcanza su óptimo entre 20-25 °C (Lang, 1993). La iniciación de yemas florales ocurre con días que duran no más de 12 horas (Darnell, 1991; Maust *et al.*, 1999). Se requieren días soleados para producir frutos de calidad; veranos nublados y fríos resultan en frutos de baja calidad y bajo contenido de azúcar (Gough, 1994).

Suelo

Los arándanos prefieren suelos ligeros y con una alta capacidad de retención de humedad (Ratnaparkhe, 2007; Korcak, 1988); suelos arenosos con baja fertilidad y bajo contenido de humedad son desfavorables para la producción (Austin, 1994). Prosperan en suelos ácidos con un pH entre 4.5-5.5, contenidos de materia orgánica de 2-3% y con buen drenaje (Nesom, 2002). Prefieren suelos con drenaje adecuado debido a que las plantas de arándano no toleran humedades excesivas por largos periodos de tiempo (Austin, 1994).

En muchos casos, se necesitan enmiendas como aplicación de compostas, abonos verdes y acidificación del medio con la finalidad de proporcionar las condiciones adecuadas para el crecimiento y desarrollo (Retamales y Hancock, 2012).

Necesidades hídricas

Por morfo-anatomía la planta de arándano carece de pelos radicales, lo que restringe la capacidad de absorción de agua, y hace que la especie sea sensible a daño por sequía. Por esta razón, se necesita un nivel adecuado de humedad, que será proporcionado por las lluvias o a través de riego artificial. Las mayores exigencias hídricas de la planta se dan durante el periodo de crecimiento y maduración de frutos (Austin, 1994; Gough, 1994).

Necesidades nutrimentales

Los arándanos tienen bajos requerimientos de nutrimentos y son sensibles a los excesos de fertilización; sin embargo, el manejo nutrimental del arándano es un factor de mucha importancia en la productividad y calidad de los frutos producidos. Elementos minerales como N, K, Ca y Mg, deben ser ajustados en los programas de manejo nutrimental del cultivo. En la medida en que se disponga de mayor conocimiento respecto de las necesidades nutrimentales del arándano para diferentes escenarios de producción y ambientes productivos, como también de los diferentes cultivares que existen, se podrán precisar los programas de manejo nutrimental y con ello mejorar e incluso optimizar la relación producción/calidad (Hirzel, 2010).

A pesar de que algunos autores han encontrado que se puede obtener un adecuado crecimiento y una buena fructificación en arándanos tipo ojo de conejo cultivados en suelos de baja fertilidad y sin aplicación de fertilizantes (Austin y Gaines, 1984), en la mayoría de las situaciones, generalmente se necesitan aplicaciones regulares de fertilizantes para los cultivos comerciales (Krewer y NeSmith, 1999; Hanson y Hancock, 1996).

Hay varias condiciones, tanto en la planta como en el suelo, que explican los bajos requerimientos nutrimentales de los arándanos. Se dice que los arándanos son plantas calcífugas, esto significa que crecen y se desarrollan de manera óptima en suelos

ácidos en los que el contenido de calcio es bajo. El mejor crecimiento y productividad se obtienen cuando crecen a un pH del suelo en el rango de 4.2 a 5.5. A este pH, la disponibilidad de la mayoría de los nutrientes del suelo es limitada y esto reduce la cantidad de elementos minerales que absorbe la planta (Retamales y Hancock, 2018; Korcak, 1988).

Los arándanos son eficientes en la absorción del calcio y por lo tanto tienen bajos requerimientos de este nutriente. Presentan niveles foliares óptimos de 0.3 a 0.8 % de Ca, debido a esto, los arándanos raramente presentan deficiencias de este nutriente (Hanson y Hancock, 1996). Son plantas tolerantes a altas concentraciones de algunos metales, especialmente Al y Mn; son eficientes en la absorción de Fe y prefieren el NH_4 como forma predominante de nitrógeno en el suelo (Korcak, 1988).

La demanda total de macronutrientes promedio en arándano ojo de conejo por tonelada de producción es de 4.7, 0.35, 5.2, 2.8 y 0.4 kg para N, P, K, Ca, y Mg, respectivamente. La demanda de micronutrientes fluctúa entre 6 a 60 $\text{g} \cdot \text{t}^{-1}$ (Vidal y Venegas, 1999).

1.2.8. Manejo

Los aspectos más importantes para el manejo del arándano son la propagación, la poda, las labores culturales, la cosecha y el almacenamiento.

Propagación

Se realiza normalmente a partir de estacas. Las estacas enraizadas de un año de edad son menos costosas, pero es preferible utilizar material vegetal de dos años para establecer la plantación (Jackson y Looney, 2002).

Poda y formación

En arándano, se realizan dos tipos de poda: de formación y de producción (Rebolledo, 2013). La poda de formación se efectúa a lo largo de los tallos e incluye la poda de yemas florales y apicales. Se realiza para estimular la brotación de yemas laterales, controlar la altura y redistribuir el crecimiento de la planta (Jackson y Looney, 2002). En los primeros 2 años de plantación del arándano deben eliminarse las yemas florales

para favorecer el desarrollo y crecimiento de brotes vegetativos vigorosos. El objetivo es lograr un desarrollo de brotes vigorosos que mantengan un equilibrio adecuado entre la producción de follaje y fruta (Rebolledo, 2013).

Con la poda de producción por otra parte, se eliminan los tallos desde su origen, de esta manera no se estimula la brotación de yemas laterales. Se emplea para remover madera muerta, brotes cruzados, ramas viejas improductivas y enfermas, logrando un mayor acceso a la penetración de la luz y la aireación promoviendo así el rejuvenecimiento de las plantas. Este tipo de poda tiene un efecto marcado en el tamaño y forma del arbusto (Rebolledo, 2013; Jackson y Looney, 2002).

Labores culturales

Los arándanos tienen un sistema radical muy superficial por lo que las labores culturales son mínimas. En suelos con humedad adecuada las malezas pueden controlarse con productos químicos. También resultan prácticas las cubiertas con aserrín (Jackson y Looney, 2002).

Cosecha

La cosecha y selección de los frutos de arándano se pueden realizar de forma manual y/o mecanizada; ambos procesos están autorizados dentro del manejo orgánico (Jackson y Looney, 2002).

Durante la cosecha, el grado de madurez del arándano es el factor más importante ya que este determina su calidad y vida postcosecha. La calidad de los frutos no puede ser provista después de la cosecha, por lo que es importante realizar esta actividad cuando el desarrollo de la baya sea óptimo para su manejo y consumo. El arándano generalmente madura de manera rápida en la planta; usualmente va de color rosa a color azul en 2 a 3 días, a partir de este momento, se requiere pocos días para desarrollar su máximo sabor y dulzor (Forney *et al.*, 2009).

El período total de desarrollo del fruto tiene un rango de 42 a 135 días en arándanos tipo arbustos altos del norte, 55 a 60 días en tipo arbustos altos del sur y 60 a 135 días para arándanos ojo de conejo (Darnell, 2006). Shoemaker (1975) reporta que el fruto

de arándano alcanza su madurez 60 a 80 días después de la floración dependiendo del cultivar y de la temperatura del lugar, originándose 5 a 10 bayas en cada racimo los cuales maduran progresivamente durante varias semanas.

Por lo general, la cosecha de arándanos se basa en el color de la superficie del fruto que debe ser 100% azul (Pino, 2007) ya que el contenido de azúcar no cambia después de ser cosechados (Moggia, 1991). Sin embargo, también se pueden utilizar como indicador el contenido de sólidos solubles totales, que se mide en °Brix y cuyo nivel óptimo debe ser mayor a 11 °Bx (García y García, 2005). Así también, la acidez titulable puede usarse como indicador. Sapers *et al.* (1984) señalan valores que varían entre 0.40 y 1.31% de ácido cítrico, contenido que disminuye conforme progresa el desarrollo del fruto (De Ell, 2002).

Almacenamiento

La cosecha y postcosecha son las etapas con mayor costo del proceso productivo, por lo que un simple error puede significar importantes pérdidas (Moggia, 1991).

Cuando los frutos alcanzan la madurez fisiológica comienzan a producirse numerosos cambios de color, firmeza y sabor, relacionados con las características organolépticas que los hacen finalmente más atractivos para el consumo. Sin embargo; una vez alcanzado el estado de madurez, sobreviene rápidamente el estado de sobre madurez, asociado a un excesivo ablandamiento y pérdida de sabor y color (García y García, 2005). Los frutos de arándano pueden permanecer en la planta durante un máximo de 10 días sin pérdida de calidad (Moggia, 1991).

La velocidad con la que ocurre la pérdida de calidad posterior a la cosecha está relacionada directamente con la temperatura (García y García, 2005), por lo que el fruto de arándano puede verse afectado por el manejo postcosecha (NeSmith *et al.*, 2002). Esta pérdida de calidad es principalmente el resultado de pudriciones, desórdenes fisiológicos, daño mecánico y deshidratación. Para evitar lo anterior, existen varios procedimientos que prolongan la vida de anaquel, como la refrigeración de los frutos y el uso de atmósferas modificadas (García y García, 2005).

El uso de bajas temperaturas, es el método más económico para el almacenamiento prolongado de frutos (Almeida *et al.*, 2011). Los arándanos cosechados deben ser enfriados, tan pronto como sea posible para reducir la velocidad de respiración y disminuir el proceso de maduración (Retamales y Hancock, 2012). Los frutos recién cosechados se pueden almacenar durante un máximo de dos semanas con una refrigeración adecuada (Moggia, 1991). Los frutos de arándano almacenados de 0 a 1 °C y con una humedad relativa de 85 a 95%, pueden mantenerse en condiciones aceptables por varias semanas (Retamales y Hancock, 2012).

1.2.9. Macro y micronutrientes en arándano

Nitrógeno

Las deficiencias de nitrógeno en arándanos son las más comunes en el mundo. Plantas con niveles deficientes de N presentan bajo vigor y hojas cloróticas. Por el contrario, excesos de nitrógeno producen raíces vigorosas y largas, así como hojas de color verde oscuro; puede reducir la producción, formar frutos más pequeños y producir una maduración tardía (Hart *et al.*, 2006; Hanson and Hancock, 1996).

Generalmente se recomienda suministrar el N en forma de NH_4 (urea, sulfato de amonio) debido a que es la forma preferible por el arándano (Hanson, 2006), sin embargo, el uso de NO_3 también ha dado efectos positivos en estas plantas (Alt *et al.*, 2017). En un estudio realizado por Bolaños (2018) se encontró que la relación NO_3/NH_4 más adecuada para el arándano es 30/70.

Las altas demandas de N en arándanos ocurren desde la floración hasta el crecimiento final del fruto (Throop y Hanson, 1998). Calcular las cantidades de demanda de N en arándanos es complicado, debido a que el nitrógeno absorbido en un año puede ser retenido en la planta y ser utilizado posteriormente durante las siguientes temporadas (Birkhold y Darnell, 1993).

Fósforo

Las deficiencias de P están asociadas principalmente a suelos muy ácidos y a su posible lixiviación en suelos arenosos (Retamales y Hancock, 2018). En condiciones ácidas, el P se fija con óxidos de Al y Fe en la superficie de los minerales arcillosos, por

lo que no está disponible para su absorción por la raíz (Zhao *et al.*, 2014). La deficiencia de P impide el crecimiento de las plantas generando hojas atrofiadas y pequeñas. Otro síntoma común es la coloración purpura en hojas maduras y tallos (Hart *et al.*, 2006; Hanson y Hancock, 1996).

Raramente se pueden observar síntomas de toxicidad por fósforo en campo. Los niveles de P en las hojas suelen ser altos a principios de la etapa productiva y suelen disminuir en la cosecha. (Krewer y NeSmith, 1999).

Se recomienda que las aplicaciones de fósforo estén basadas en análisis tanto del suelo como foliares, ya que a pH's bajos, el Fe y el Al se encuentran en altas concentraciones lo que puede afectar los resultados de la disponibilidad P en el suelo (Krewer y NeSmith, 1999).

Potasio

Niveles bajos de potasio son raros en arándano, excepto en suelos arenosos. Al igual que otros frutales, la clorosis en los márgenes de las hojas maduras es el primer síntoma de deficiencia de potasio. Este síntoma puede provocar quemaduras a lo largo de los márgenes, manchas necróticas y finalmente la muerte del tejido foliar (Hart *et al.*, 2006). En hojas jóvenes puede desarrollarse clorosis intervenal similar a la deficiencia de Fe (Hanson y Hancock, 1996). Bajos niveles foliares de K se deben a una serie de factores como función radicular reducida, inundación, drenaje deficiente, niveles altos de N, sequía y suelos muy ácidos (Stiles y Reid, 1991).

Excesos de potasio pueden provocar desequilibrios en otros nutrimentos, particularmente deficiencias de Ca y Mg (Stiles y Reid, 1991).

Debido a que el fruto es un órgano que demanda altas concentraciones de K, los niveles foliares de este nutrimento se ven influenciados en gran medida por la carga de frutos. Los niveles de K se incrementan conforme madura el fruto, concentrando alrededor de 60 mg por fruto maduro (Hart *et al.*, 2006).

Calcio

Los arándanos se consideran plantas calcífugas, clasificación que se les ha atribuido debido a que se desarrollan de manera óptima en suelos ácidos donde los contenidos de Ca son bajos (Retamales y Hancock, 2018). Aunque esta clasificación se basa principalmente en los niveles de Ca en el suelo, también implica otros factores importantes, como las diferencias fisiológicas entre especies vegetales y diferencias fisicoquímicas entre los suelos (Korcak, 1988).

Los arándanos son eficientes en la absorción del calcio y por tal motivo tienen bajos requerimientos de este nutrimento con respecto a otros frutales de clima templado (Retamales y Hancock, 2018). Plantas sanas presentan concentraciones foliares que van de 0.3 a 0.8% de Ca, en comparación con otros frutales que tienen niveles foliares de 1 hasta 4% (Hanson y Hancock, 1996; Hart *et al.*, 2006).

Sin embargo, incluso cuando los niveles de las hojas indican un suministro adecuado de calcio, existe la posibilidad de que se presenten deficiencias del nutrimento en los tejidos del fruto, afectando directamente su textura, firmeza y tasa de maduración (Hanson *et al.*, 1993). Este efecto negativo es producido por una movilización insuficiente de Ca de las reservas internas o por un suministro reducido de Ca a través del xilema, a menudo como resultado de bajas tasas de transpiración (Hocking *et al.*, 2016). Aunque actualmente no existen informes sobre deficiencias de Ca en arándanos (Hirschi, 2004), los síntomas de deficiencia deben ser similares al de otros cultivos, presentándose como una clorosis intervenal y/o pardeamiento de los tejidos más jóvenes, es decir, en los bordes de las hojas recién formadas (Hanson y Hancock, 1996). Un alto suministro de K y N, así como grandes fluctuaciones de humedad durante la temporada, pueden acentuar la severidad de las deficiencias de Ca en la planta (Hirschi, 2004).

En presencia de altos niveles de Ca, los arándanos no pueden regular la entrada del nutrimento a los tejidos lo que provoca una acumulación excesiva, la cual reduce la absorción de Fe por las raíces e interfiere con el metabolismo de Mg y K en las plantas (Krewer y NeSmith, 1999).

Cuando la absorción de Ca excede las necesidades de la planta, parte del Ca absorbido es secuestrado para formar oxalatos de calcio, los cuales, se depositan en las vacuolas de células especializadas. Este mecanismo también es utilizado para aumentar la tolerancia a altos niveles de metales pesados (Franceschi y Nakata, 2005).

Magnesio

Se han reportado deficiencias de magnesio en diversas áreas donde se cultiva arándano como Georgia (Krewer y NeSmith, 1999) y Michigan (Hanson y Hancock, 1996). Niveles muy bajos de Mg son comunes en suelos con pH ácido (Eck *et al.*, 1990). Las deficiencias de Mg son más severas en plantas de crecimiento rápido o en aquellas con altas cargas de fruto (Retamales y Hancock, 2018).

La clorosis intervenal es el síntoma más característico de las deficiencias de Mg. Las hojas pueden volverse rojas, amarillas o marrones y caer prematuramente de la planta a medida que la deficiencia se vuelve más severa. Las hojas basales de las cañas y los tallos productivos son las primeras en mostrar síntomas (Hanson y Hancock, 1996). Krewer y NeSmith (1999) mencionan que un síntoma común que se puede observar en arándanos jóvenes tipo ojo de conejo son hojas con bordes de color rosa y amarillamiento entre las venas. Estas áreas foliares posteriormente se vuelven de amarillas a rojo brillante, mientras que el tejido adyacente a las venas principales permanece verde (Hanson y Hancock, 1996).

Aunque generalmente se ha establecido que el nivel de deficiencia de Mg en hoja está por debajo de 0.1%, se han reportado deficiencias en arbustos con niveles foliares de 0.2% (Hanson y Hancock, 1996).

Altos niveles en Ca y/o K reducen la absorción de Mg. En general, para fines prácticos en frutales, una proporción porcentual K:Mg mayor o igual a 4:1 en muestras foliares indica un suministro inadecuado de Mg (Stiles y Reid, 1991).

Parámetros de calidad importantes para los cultivos hortícolas, como sólidos solubles totales y acidez titulable, a menudo se correlacionan muy estrechamente con las relaciones catiónicas Ca:Mg y K:Mg. Además, la relación Ca:Mg también es importante

en las propiedades funcionales del fruto, como firmeza, textura y vida postcosecha, que están determinadas principalmente por el papel del Ca en la estabilización de las paredes celulares. Como el Mg puede reemplazar al Ca en los sitios de unión, un desequilibrio en la relación Ca:Mg en el tejido afecta negativamente estas propiedades (Gerendás y Fühns, 2013).

Azufre

Las deficiencias en S son raras en los arándanos y a menudo se confunden con deficiencias de N. Las plantas deficientes de este nutrimento se deforman y presentan hojas de color verde claro sin ningún patrón o moteado, apareciendo ´ primeramente en los tejidos más jóvenes (Beaton, 1966).

Fertilizantes como el sulfato de amonio, el superfosfato simple, el sulfato de potasio y el sulfato de magnesio son fuentes de azufre que pueden usarse en los programas de fertilización para corregir deficiencias (Korcak, 1988).

Hierro

Las deficiencias de hierro son comunes en arándanos. Bajo esta condición, los márgenes de las hojas jóvenes se vuelven cloróticas mientras que las venas permanecen verdes; a medida que la deficiencia progresa, las hojas se tornan de color café o de color dorado. La clorosis intervenal inducida por la deficiencia de Fe difiere del que es causado por la deficiencia de Mg, ya que en el primer caso las venas principales y muchas venas menores permanecen verdes en las hojas, mientras que en el segundo caso no sucede esto (Retamales y Hancock, 2018). Asimismo, el crecimiento de los tallos productivos y el tamaño de las hojas se ven reducidos por la baja disponibilidad de Fe (Hanson y Hancock, 1996).

Los síntomas de deficiencia de Fe en arándanos generalmente están relacionados con un pH del suelo mayor a 5.5 (Hanson y Hancock, 1996). Esta deficiencia también ha sido asociada a suelos saturados, drenaje inadecuado o con altos niveles de Mn o P (Stiles y Reid, 1991).

Los niveles foliares de Fe no siempre son un indicador real del estado del micronutriente en la planta, ya que los síntomas pueden aparecer en un amplio rango de concentraciones de Fe en la hoja. Esto se debe a que una parte del hierro determinado no está disponible para el metabolismo (Krewer y NeSmith, 1999). Al respecto, Katyal y Sharma (1981) indican que la deficiencia de Fe esta correlaciona con la concentración de Fe fisiológicamente activo y no con la concentración total de Fe en el tejido.

Para corregir las deficiencias de Fe es necesario ajustar principalmente el pH del suelo y realizar aplicaciones foliares (Hart *et al.*, 2006). Pueden utilizarse compuestos de Fe inorgánicos, quelatos de Fe sintéticos y complejos de Fe naturales (Retamales y Hancock, 2018).

Manganeso

Las deficiencias de manganeso no son comunes en áreas donde se cultiva arándano, ya que, en condiciones ácidas del suelo, las concentraciones de Mn son tan altas que se vuelven tóxicas para la mayoría de las plantas (Retamales y Hancock, 2018; Hart *et al.*, 2006).

En arándanos, los niveles de Mn en el tejido aumentan a medida que el pH disminuye. Niveles por encima de 450 mg·kg⁻¹ en tejido son considerados excesivos, especialmente si se presentan por largos periodos. Sin embargo, está reportado que los arándanos de arbustos altos pueden crecer normalmente con concentraciones foliares de hasta 650 mg·kg⁻¹ (Hart *et al.*, 2006).

El efecto tóxico principal del Mn es la reducción de la biosíntesis de pigmentos fotosintéticos (clorofila a/b y carotenoides) y la disminución de las tasas netas de fotosíntesis, provocando un crecimiento lento en las plantas (Rojas *et al.*, 2014; Stiles y Reid, 1991). Altos contenidos de Mn pueden inducir deficiencias de Ca, lo que da como resultado una reducción en tamaño de las hojas jóvenes y malformación de las mismas (Stiles y Reid, 1991).

Por otro lado, cuando existen deficiencias de Mn, las hojas se vuelven pequeñas y comienzan a presentar muerte celular en áreas cercanas a los márgenes (Fuqua *et al.*, 2005). Para disminuir estos efectos se recomienda realizar aplicaciones foliares de quelatos de manganeso durante el verano (Hanson y Hancock, 1996).

Cobre

Las deficiencias de cobre son inusuales en arándanos tipo arbustos altos y ojo de conejo (Hart *et al.*, 2006). Los síntomas de deficiencia de Cu son similares a los producidos por deficiencias de Mn. Incluyen clorosis intervenal en hojas jóvenes y, en casos muy severos, muerte regresiva (Hanson y Hancock, 1996).

Suelos de textura gruesa con pH's alcalinos y niveles altos de P tienden a acentuar las deficiencias de Cu en los tejidos (Stiles y Reid, 1991). Estas deficiencias pueden ser más severas en suelos con contenidos de materia orgánica mayores a 25% (Hart *et al.*, 2006).

Zinc

Los síntomas de deficiencia de zinc incluyen entrenudos cortos y un amarillamiento uniforme de hojas jóvenes sin un patrón intervenal. Las hojas afectadas pueden enrollarse de abajo hacia arriba a lo largo de la nervadura central (Retamales y Hancock, 2018). La importancia de estas deficiencias varía según las regiones productivas (Hart *et al.*, 2006).

Las deficiencias de Zn se acentúan con pH's altos (>6.0) y bajas temperaturas del suelo. El uso excesivo de P también puede conducir a una deficiencia de Zn (Stiles y Reid, 1991).

Boro

Cuando se presentan deficiencias de boro, la muerte regresiva de los ápices es el síntoma típico en los arándanos. Las hojas más cercanas a las puntas de los tallos productivos desarrollan una clorosis moteada y un enrollamiento del tejido foliar. Los entrenudos tienden a ser más cortos en tallos afectados (Hanson y Hancock, 1996). Las yemas florales y vegetativas pueden no abrirse o no desarrollarse en plantas de

arándanos gravemente afectadas (Hart *et al.*, 2006). El daño de los ápices radicales también es un efecto importante de la deficiencia de B; puede generar y acentuar deficiencias de otros nutrimentos (Retamales y Hancock, 2018).

La deficiencia de B es frecuente en suelos de textura ligera, donde el boro soluble se filtra fácilmente por el perfil del suelo. Esta deficiencia también puede ocurrir en suelos con niveles adecuados de B debido a condiciones de sequía o alta humedad del suelo, o bien debido a bajos niveles de O_2 (Ganie *et al.*, 2013). En frutales, bajos niveles de B se han asociado con problemas de deficiencia de Ca (Stiles y Reid, 1991).

1.2.10. Dinámica nutrimental de suelos ácidos

Los suelos ácidos se caracterizan principalmente por presentar un pH bajo (pH 4.5-5.5, fuertemente ácido, o pH <4.5, extremadamente ácido), baja capacidad de intercambio catiónico y baja saturación de bases (Shen *et al.*, 2006).

La solubilidad de varios iones metálicos potencialmente tóxicos como el Al, Mn y Fe aumenta a medida que disminuye el pH, mientras que varios nutrimentos, como el Ca, Mg, K y P se vuelven deficientes debido a la lixiviación o precipitación (Zhao *et al.*, 2014). El pH también afecta la transformación de las fuentes inorgánicas de N en el suelo, así como la absorción de NO_3 y NH_4 por las plantas. Debido a las bajas tasas de nitrificación en suelos ácidos la forma predominante del nitrógeno es el NH_4 (Zhao *et al.*, 2014).

La toxicidad por Al es generalmente la principal limitación para el crecimiento de las plantas en suelos ácidos. Altas concentraciones de Al en el suelo afectan fuertemente la raíz lo que dificulta la capacidad de absorción de nutrimentos (Zhao *et al.*, 2014). A pH's por debajo de 5.5, las concentraciones altas de H^+ favorecen la intemperización de los minerales, lo que genera una liberación de iones como K, Mg, Ca, Mn, Cu y Al. La liberación de aluminio, causada por la disolución de compuestos hidroxialumínicos, produce niveles tóxicos de Al soluble en el suelo (Mengel y Kirkby, 2000).

El grado de afectación en las plantas debido a estas condiciones edáficas, dependen en gran medida de las interacciones del Al con otros nutrimentos. En suelos ácidos, el

crecimiento de las plantas generalmente está limitado por una combinación de concentraciones tóxicas de Al, Mn, Fe y protones (H^+) y deficiencias de P, K, Ca, Mg y Mo (Marschner, 2012). Un pH ácido aumenta las concentraciones de Al, Mn y Fe provocando una inmovilización y reducción de la disponibilidad de P. Las deficiencias de Ca, Mg y K pueden ser causadas directamente por bajas concentraciones en los suelos como resultado de la lixiviación e indirectamente por los efectos inhibitorios de H^+ y Al (Zhao *et al.*, 2014).

1.3. Tratamiento magnético del agua y las soluciones acuosas

1.3.1. Introducción

La comprensión de los efectos producidos por un campo magnético (CM) durante y después de su interacción con el agua y las soluciones acuosas sigue siendo un tema controvertido a pesar de que estos efectos han sido reportados durante al menos medio siglo (Chibowski y Szcześ, 2018).

De acuerdo a Ambashta y Sillanpää (2010) el tratamiento magnético del agua se remonta a más de 100 años y surge como una técnica para la disminución de los efectos adversos producidos por la acumulación de precipitados en las paredes de sistemas industriales (tratamiento magnético anticalcáreo), en particular en aquellas en las que hay intercambio de calor, como lo son las calderas, y con ello reducir el uso de productos químicos como ácidos fuertes o polifosfatos, que además de ser costosos, son nocivos para la vida humana y el medioambiente.

El tratamiento no químico del agua para el control de incrustaciones, debido a la precipitación de carbonatos en los sistemas de conducción de agua, se propuso por primera vez por Porter en 1865. En 1945 en Bélgica se patentó el primer dispositivo comercial (Vermeiren, 1958). A partir de ese año hasta la actualidad, se han creado numerosos dispositivos magnéticos que se han utilizado principalmente para el tratamiento anticalcáreo; sin embargo, ha existido poco avance científico con respecto a esta técnica y sus aplicaciones prácticas. Debido a esto, aún se tienen muchas limitantes para la comprensión del fenómeno hidromagnético y su uso práctico en algunos procesos de interés. Es a partir de las últimas décadas, que los trabajos de investigación en torno a este tema empiezan a tomar relevancia y se comienza a publicar información de los efectos observados por el uso de agua tratada magnéticamente en la industria (Piyadasa *et al.*, 2017; Sohaili *et al.*, 2016; Zaidi *et al.*, 2014) y la agricultura (Hachicha *et al.*, 2018; Surendran *et al.*, 2016).

La respuesta del agua al tratamiento magnético se debe principalmente a sus propiedades diamagnéticas que fueron descubiertas por los trabajos de Ueno e Iwasaka (1994 a, b) donde, al utilizar imanes superconductores de hasta 8 T sobre una columna con agua, observaron que el agua rechazó el campo magnético aplicado al

separarse la columna de agua desde el centro hacia las paredes del recipiente; la disminución en el nivel del agua por rechazo del CM fue proporcional al cuadrado de la inducción magnética.

Según Hachicha *et al.* (2018), la tecnología del tratamiento físico del agua mediante un dispositivo magnético que funciona con muy baja frecuencia y muy bajas intensidades, permite recrear una estructura de agua natural y optimizada en su capacidad para disolver y transportar solutos, afectando de esta manera el comportamiento de los materiales inorgánicos y orgánicos disueltos en el agua, incluida la cristalización y los procesos biológicos. Estos supuestos son apoyados por algunos trabajos como el de Pang y Deng (2008) que, a través de técnicas espectroscópicas, determinaron los cambios producidos en el agua por efecto de un CM. Los resultados indicaron que los CM's producen una distribución y polarización de las moléculas del agua debido a cambios en los momentos dipolares y estados vibracionales de los átomos, así como la variación energética de los electrones en las capas internas de los átomos.

De acuerdo a la física electrodinámica, un CM actúa sobre la estructura del agua, dándole propiedades que crean una mejor disolución y distribución de los solutos en el agua, que resulta en los efectos observados a nivel macroscópico (Hachicha *et al.*, 2018), como una mejor distribución del agua en el suelo (Mostafazadeh *et al.*, 2011) y una mayor absorción de nutrientes por parte de las plantas (Hachicha *et al.*, 2018; El Sayed y El Sayed, 2014; Grewal y Maheshwari, 2011).

Son cuatro factores los que determinan el mecanismo de interacción de un CM sobre el agua: a) la magnetización; b) el gradiente magnético; c) la fuerza de Lorentz y d) la memoria magnética (Zaidi *et al.*, 2014). Sin embargo, Baker y Judd (1996) mencionan que la efectividad del tratamiento magnético del agua sigue siendo un tema debatible y frecuentemente criticable, ya que los mecanismos de interacción entre el CM y el agua no han sido confirmados científicamente. Muchos trabajos proponen distintos tipos de mecanismos teóricos, por lo cuales, un CM produce efectos micro y macroscópicos en el agua. De acuerdo a Chibowski y Szcześ (2018), las propuestas teóricas se pueden clasificar en dos tipos de mecanismo: a) mecanismo iónico, relacionado con la influencia

de un CM sobre los iones y las moléculas de agua; b) mecanismo de superficie, relacionado con la influencia de un CM sobre los núcleos y partículas disueltas.

1.3.2. Mecanismo iónico

El mecanismo iónico propone que un CM actúa sobre los iones disueltos en agua, tales como Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , HCO_3^- y SO_4^{2-} así como las moléculas de agua, en particular los clústers, que son agrupamientos de varias moléculas de agua de forma y tamaño definidos y cuya estructura geométrica depende de la disposición de las moléculas y los puentes de hidrógeno (Chibowski y Szcześ, 2018; Mosin e Ignatov, 2014).

Este mecanismo indica que la acción de un CM sobre el agua provoca una polarización de los iones disueltos y una disminución de las capas de hidratación, factor que contribuye a la solubilidad de las sales disueltas en agua, la disociación electrolítica, las constantes cinéticas y las velocidades de las reacciones químicas en equilibrio en soluciones acuosas, aumentando así, la probabilidad de reacción de los iones hidratados, dando lugar a cambios en los procesos de nucleación, cristalización y sedimentación de sales inorgánicas, produciendo una formación y una desintegración espontánea de los complejos coloidales de cationes metálicos Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} y Fe^{3+} (Mosin e Ignatov, 2014).

Asimismo, un CM interactúa con los dipolos del agua influyendo directamente en la estructura de los clústers. La influencia de un CM puede causar una deformación de los puentes de hidrógeno provocando su ruptura parcial, así como la migración de protones H^+ móviles dentro de los clústers y la redistribución de moléculas de H_2O en clústers temporales. Estos efectos pueden alterar la estructura del agua que conduce a los cambios observados en su densidad, tensión superficial, viscosidad, valor de pH, así como una alteración de los procesos químicos que ocurren en el agua, incluyendo la disolución y cristalización de sales inorgánicas (Mosin e Ignatov, 2014).

Silva *et al.* (2015) consideran que la fuerza de Lorentz es la responsable de los efectos observados, al influir en la polarización iónica, especialmente en aquellos cationes divalentes que están hidratados con más fuerza que los aniones, posteriormente los

iones permanecen orientados en un cierto lapso de tiempo definido, denominado memoria magnética (Colic y Morse, 1999). Este efecto magnético solo ocurre en el mecanismo iónico ya que el mecanismo de superficie solo implica procesos de precipitación cuando el CM está presente (Saksono *et al.*, 2008).

Esta propuesta explicaría el cambio en el tamaño de partícula en soluciones tratadas y no tratadas, así como los cambios en las estructuras cristalinas precipitadas. Sin embargo, para que pueda manifestarse la fuerza de Lorentz se requieren de ciertas condiciones, la más importante es que debe existir un movimiento continuo de los iones para que estos puedan alinearse al CM aplicado y se produzca una reorientación de los mismos (Silva *et al.*, 2015). Esto fue confirmado por experimentos realizados bajo condiciones estáticas, en donde no se observaron cambios en la viscosidad del líquido ni en las tasas de sedimentación de partículas (Silva *et al.*, 2015). Esto apoya la hipótesis de que la fuerza de Lorentz es la causante de la polarización iónica en condiciones cinéticas.

Los CM's y el carbonato de calcio en solución

El uso de agua tratada magnéticamente surge de la necesidad de disminuir el escalado y sus efectos adversos. Por lo tanto, existen una gran cantidad de trabajos relacionados con el uso de esta técnica sobre la formación de precipitados, principalmente CaCO_3 , en los sistemas de conducción de agua. El escalado es la deposición de sales de baja solubilidad que se han recristalizado a partir de una solución y que forman incrustaciones en las superficies con las que entran en contacto. Esto ocurre frecuentemente como resultado de cambios en el pH, cambio de temperatura, desgasificación o cambio de presión que afectan la solubilidad de las sales (Baker y Judd, 1996).

El escalado es el resultado de una serie de procesos que se dan de manera consecutiva: sobresaturación, nucleación, crecimiento del cristal (cristalización), separación y deposición, siendo la nucleación el proceso más importante en donde se define la forma de precipitación de las sales. Existen dos tipos de nucleación que se encuentran presentes en la solución de forma paralela: la nucleación homogénea y la heterogénea (Alabi *et al.*, 2015).

La nucleación homogénea es la formación de cristales en el interior de la solución debido a un cambio en la solubilidad relativa de los iones presentes, que comienza en soluciones sobresaturadas con pares iónicos que forman cristales individuales. El primer proceso dentro de un fluido saturado es la formación de grupos de átomos inestables; los grupos de átomos forman pequeños cristales, también denominados semillas, debido a fluctuaciones locales en el equilibrio de la concentración iónica de la solución. Posteriormente los cristales crecen por la adsorción de iones sobre las imperfecciones de sus superficies, con lo cual eventualmente, aumenta el tamaño del cristal. Cuando la formación de semillas y el crecimiento del cristal se producen sobre las superficies de contacto, como la superficie interna de la tubería, se le denomina nucleación heterogénea (Crabtree *et al.*, 1999).

El CaCO_3 es el constituyente más común en la formación de incrustaciones; se incluyen también otros compuestos como MgCO_3 , CaSO_4 , BaSO_4 , SrSO_4 , FeCO_3 , Fe_2S_3 , FeO y Fe_2O_3 , silicatos, fosfatos y óxidos de cualquier compuesto con baja solubilidad en agua (Alabi *et al.*, 2015).

De acuerdo a Alabi *et al.* (2015) el carbonato de calcio CaCO_3 presenta un grupo importante de polimorfos y por lo tanto se puede encontrar en distintas fases: como carbonato de calcio amorfo (ACC, fase amorfa), monohidrocalcita e ikaita (fases hidratadas) y como vaterita, aragonita y calcita (fases cristalinas anhidras o polimórficas).

La calcita y la aragonita son los sistemas cristalinos más comunes del carbonato de calcio. La calcita tiene una estructura cristalina trigonal-romboédrica, y es la fase termodinámicamente más estable del carbonato de calcio, suele asociarse a un escalado más acentuado. La estructura cristalina de la aragonita es ortorrómbica, forma un escalado suave no adherente que se elimina fácilmente mediante el flujo del fluido (Alabi *et al.*, 2015; Sarkar y Mahapatra, 2010).

En varios trabajos se han encontrado cambios en la deposición del CaCO_3 en solución por efecto de un CM. Higashitani *et al.* (1993) encontraron que en una solución de Na_2CO_3 tratada con un CM de 300 mT durante 10 minutos, bajo condiciones estáticas,

se aceleró la formación de cristales de aragonita. Lungader (1995) observó que un CM afectaba tanto a los iones de Ca^{2+} como los de HCO_3^- , reduciendo los tamaños de partícula de CaCO_3 , lo que resultó en un mayor número de núcleos formados. Chibowski *et al.* (2003a) estudiaron el efecto de un CM sobre precipitados de CaCO_3 en condiciones estáticas a partir de soluciones tratadas magnéticamente con Na_2CO_3 (5, 20, 70 min a 30 °C). Se observaron velocidades de nucleación y sedimentación más lentas de carbonato de calcio precipitado *in situ*. Fathi *et al.* (2006) encontraron que el tratamiento magnético aumentó la cantidad de CaCO_3 precipitado y que su eficacia dependió del pH de la solución, del flujo y el tiempo de tratamiento. Además, promovió la nucleación homogénea sobre la heterogénea. Los autores concluyeron que los efectos magnéticos afectan la asociación iónica presente en la solución, así como los estados electrocinéticos producidos en la superficie de contacto, que son los responsables del proceso de nucleación y precipitación del CaCO_3 .

Los efectos magnéticos también se explican por cambios inducidos en las capas de hidratación de iones o superficies sólidas. Según Lungader (2004, 1995) el CM induce un aumento en la transferencia de H^+ del HCO_3^- al agua debido a la interconversión del spin del H^+ , incrementando de esta manera la formación de iones CO_3^{2-} , lo cual modifica posteriormente, el proceso de precipitación. Otra explicación propuesta por Higashitani *et al.* (1993) se relaciona con la influencia específica de un CM sobre las capas de hidratación de los iones Ca^{2+} y HCO_3^- que podría modificar directamente el equilibrio de la fase polimorfa durante la precipitación. Este mismo fenómeno, también podría afectar el proceso de deshidratación de los pares iónicos y las fases de carbonato de calcio hidratado que actúan como precursores para la formación de las fases cristalinas que constituyen el precipitado de CaCO_3 .

Los cambios producidos en el agua por efecto de un CM alteran los procesos cineticoquímicos presentes. Esto se refleja en una disminución en la formación de incrustaciones debido a un aumento en la velocidad de formación de aragonita, más que de calcita, lo que debilita la adhesión de los precipitados en las paredes de la tubería (Chang y Tai, 2010; Chibowski *et al.*, 2003b; Kobe *et al.*, 2003).

Alimi *et al.* (2009a) mencionan que la efectividad de un CM en el proceso de cristalización y precipitación de CaCO_3 también dependerá del tipo y la rugosidad del material utilizado en el sistema de conducción del agua, así como la velocidad del flujo. Los autores encontraron que el efecto de un CM sobre la nucleación homogénea y la cantidad de CaCO_3 precipitado es menos significativo si el agua está en contacto con materiales conductores, por lo tanto, los materiales no conductores se consideran más eficientes para el tratamiento físico del agua con un CM.

Los CM's y las soluciones salinas

Silva *et al.* (2015) investigaron el efecto de un CM de 1000 mT sobre soluciones compuestas por nitratos de Ba, Sr, Ca y Ag, Na_2SO_4 y NaCl. Observaron que los precipitados fueron principalmente sulfatos y AgCl. El efecto más evidente se encontró en el caso de SrSO_4 , cuyas partículas fueron más pequeñas y presentaron una dispersión más estable. Este efecto duró aproximadamente dos días (memoria magnética) después de que el CM fue retirado; sin embargo, el efecto del CM desapareció 20 min después de calentar la solución a 60 °C. Sus experimentos demostraron que los cationes divalentes no solo son más susceptibles a un CM que los monovalentes, sino que también son más susceptibles que los aniones di y monovalentes.

La influencia del campo magnético en diferentes impurezas iónicas y en la precipitación de CaCO_3 ha sido investigada anteriormente por varios autores (Chibowski *et al.*, 2004; Chibowski *et al.*, 2003c; Holysz *et al.*, 2003), quienes han encontrado que el efecto de un CM (400-500 mT) sobre la precipitación de CaCO_3 depende de la entropía en las capas de hidratación de los iones Mg^{2+} , Fe^{2+} y SO_4^{2-} presentes en la solución, reflejándose en cambios de potencial zeta (positivo en Fe^{2+} y negativo en presencia de SO_4^{2-}).

Alimi *et al.* (2009b) encontraron que la presencia de Mg^{2+} y SO_4^{2-} aumentó la precipitación del CaCO_3 bajo la influencia de un CM (160 mT, 15 min). En otro estudio se observó que en presencia de Fe^{2+} y bajo la influencia de un CM disminuye la precipitación de aragonita mientras que en ausencia del CM la precipitación aumenta (Wang *et al.*, 2012).

1.3.3. Mecanismo de superficie

Este mecanismo considera que los efectos de un CM se deben principalmente a la acción del campo sobre las partículas en solución, como el CaCO_3 . El CM puede afectar la carga superficial de las partículas y así aumentar la tasa de nucleación y precipitación de CaCO_3 (Kney y Parsons, 2006; Barrett y Parsons, 1998).

Kney y Parsons (2006) observaron una precipitación más rápida al aplicar un CM sobre una solución de semillas (núcleos) de CaCO_3 . Los experimentos fueron realizados con precisión y se evaluaron estadísticamente, lo que les permitió obtener resultados reproducibles. Los autores concluyeron que el mecanismo de superficie es probablemente el mecanismo responsable de los efectos observados.

Saksono *et al.* (2008) llevaron a cabo experimentos para determinar cuál de los dos mecanismos es más propenso a presentarse cuando se aplica un CM. Los autores mencionan que ambos mecanismos pueden ocurrir al mismo tiempo, pero que el mecanismo predominante dependerá de la composición de la solución. En este estudio se encontró que la acción de un CM sobre el Ca^{2+} y el CO_3^{2-} (mecanismo iónico) resultó en una disminución de la cantidad de CaCO_3 precipitado, un menor número de partículas y un aumento en el diámetro medio de los cristales de CaCO_3 . Por el contrario, las observaciones en el mecanismo de superficie, mostraron un aumento en el número de partículas, un menor diámetro medio de los cristales y una mayor cantidad de CaCO_3 precipitado. De acuerdo a los autores, el mecanismo de superficie disminuyó la concentración de iones Ca^{2+} en la solución durante la magnetización, y el mecanismo iónico redujo la formación de partículas de CaCO_3 después de los procesos de magnetización y separación.

Koshoridze y Levin (2014) investigaron teóricamente la disminución del potencial electrocinético de las partículas coloidales de tamaño nanométrico al cruzar un CM estático. Los autores sugieren que, en una solución no sobresaturada, cuando se aplica un CM, se activa el proceso de agregación promoviéndose la cristalización en la superficie de las partículas. La agregación puede continuar rápidamente debido a la falta de barrera electrostática avanzando sobre las partículas suspendidas en la solución y no sobre las paredes de la tubería.

1.3.4. Teorías de interacción entre los CM's y el agua

Reestructuración de los clústers del agua

Wang *et al.* (2012) sugieren que los efectos observados podrían explicarse por el mecanismo de reestructuración de clústers. El agua no es un líquido uniforme compuesto solamente por moléculas de agua libre, sino también por cadenas de moléculas de agua unidas por puentes de hidrógeno, los cuales forman distintas configuraciones en el espacio (Pang, 2014a). La física cuántica indica que el agua es una materia organizada y estructurada, y puede adoptar muchas conformaciones diferentes. La organización de este líquido, se crea a través de la formación de agrupaciones de varias moléculas de agua denominados clústers, los cuales, presentan un arreglo geométrico acorde a la disposición de los puentes de hidrógeno presentes. Dependiendo de la estructura tomada por el agua, el comportamiento de los solutos disueltos y los materiales biológicos es distinto (Hachicha *et al.*, 2018). Esta idea es apoyada por las simulaciones dinámicas moleculares realizadas por Guo *et al.* (2011) y Toledo *et al.* (2008).

Guo *et al.* (2011) aplicaron el modelo de carga puntual simple extendida (SPC/E) de potencial intermolecular para el agua y para las interacciones ion-agua utilizaron el potencial de interacción 6-12 Lennard-Jones y las interacciones coulombianas. El modelo SPC/E considera al agua como un triángulo formado por una molécula triatómica con enlaces rígidos que tienen cargas situadas en cada uno de los tres átomos. Además de las interacciones coulombianas electrostáticas, las moléculas interactúan a través del potencial de Lennard-Jones de largo alcance localizado sobre cada centro atómico en donde se encuentran las cargas puntuales. Los cálculos indicaron que un CM aumenta el contacto entre los pares iónicos y disminuye el de las moléculas del agua, afectando la estructura de los clústers. Esto se debe a que la fuerza de Lorentz acelera el movimiento de los iones, lo que aumenta la probabilidad de colisión y disminuye las interacciones entre los iones y el agua. Las simulaciones también mostraron que el coeficiente de difusión de cationes aumenta y el de aniones disminuye.

La fuerza de Lorentz también puede afectar la energía cinética de los dipolos del agua, generando impulsos modificados a lo largo de los puentes de hidrógeno en los clústers,

lo que haría posible el debilitamiento o incluso la ruptura de los puentes de hidrógeno, y la liberación de moléculas de agua (Chibowski y Szcześ, 2018). Usando este enfoque, Seyfi *et al.* (2017) sugirieron que después del tratamiento con un CM, el esqueleto estructural de los clústers cambia, es decir, se generan más moléculas de agua monoméricas disminuyendo la estabilidad de los clústers de agua.

Por otra parte, Toledo *et al.* (2008) realizaron simulaciones moleculares con programas computacionales para estudiar la influencia de un CM en la energía de los clústers y las interacciones de las moléculas de agua. Los investigadores encontraron que existen clústers que son termodinámicamente más estables que otros y esto depende principalmente del número de moléculas de agua que los conforman, así como de su geometría. La estabilidad termodinámica del clúster es mayor cuando está formada por 3, 4, 8 y 12 moléculas de agua y cuando su geometría es simétrica. Sugieren que un CM disminuye la estabilidad de cada clúster a través de alteraciones en las moléculas de agua, provocando un debilitamiento de los puentes de hidrógeno intracluster y fortaleciendo los puentes intercluster, provocando así su ruptura temporal para posteriormente reordenarse y formar clústers más pequeños y estables, que sólo existen por un determinado periodo de tiempo mientras dure el efecto del CM o bien hasta que el sistema recupere su estado original. A este lapso de tiempo es a lo que le denomina memoria magnética del agua.

Puentes de hidrógeno y rotores moleculares

Algunos autores han intentado explicar los efectos de un CM tomando en cuenta los enlaces intermoleculares del agua, es decir, cambios estructurales en los puentes de hidrógeno. Chang y Weng (2006) aplicando simulaciones de dinámica molecular y utilizando un modelo flexible de agua tricentral (4,096 moléculas de agua en un recipiente cúbico de 4.8 nm de longitud a 300 K) encontraron que un CM (0-10 T) causa un aumento de 0.34% en la cantidad de puentes de hidrógeno.

Pang (2014b), basándose en resultados experimentales, donde la histéresis apareció en las curvas de magnetización obtenidas a varias intensidades de CM, y del análisis de los picos de difracción de rayos X, postuló que el agua posee propiedades magnéticas temporales después del tratamiento con un CM. Sostuvo que esta

aseveración se puede confirmar teóricamente por la transferencia de H^+ en las moléculas de agua enlazadas por puentes hidrógeno. Toledo *et al.* (2008) basados en las mediciones de viscosidad, entalpías de vaporización y tensión superficial, además de usar cálculos teóricos (simulaciones de Monte Carlo), señalaron que un CM estático (45-65 mT) rompe los puentes de hidrógeno intracluster y fortalece los puentes intercluster.

Kobe *et al.* (2003) utilizando el modelo hidrodinámico y las ecuaciones de Navier-Stokes y Maxwell establecieron que debe existir un fuerte acoplamiento de energía para que la transferencia entre la energía cinética del flujo turbulento y el campo magnético pueda incrementar exponencialmente. Además, mencionan que incluso en ausencia de un CM externo, los campos magnéticos pueden generarse dentro la solución. Los autores consideran que el principal problema para comprender los efectos de un CM son el acoplamiento y la transferencia de energía magnética entre el CM y las moléculas de agua. En el caso del flujo turbulento de una solución conductora, el campo magnético puede extenderse siguiendo los iones y las moléculas en movimiento y de esta manera el efecto se fortalece, provocando cambios en la solución, como modificaciones en las fases de cristalización del $CaCO_3$. A este fenómeno Cefalas *et al.* (2008) lo denominaron “transición de fase de un cristal magnético (MCPT)” y es explicada por un modelo teórico elaborado a partir de la electrodinámica cuántica (QED) que describe las interacciones de las partículas cargadas eléctricamente a través de un intercambio de fotones y es la contraparte cuántica del enfoque electromagnético clásico.

Cefalas *et al.* (2010, 2008) consideran que las moléculas de agua al interactuar con un CM funcionan como entidades giratorias (rotores moleculares) los cuales presentan dos estados energéticos. Postularon que el agua en ausencia de un CM tiene un estado coherente simétrico. Al aplicarle un CM externo, incluso débil, existe un acoplamiento y transferencia de energía que causa una excitación y rotación coherente de un conjunto de rotores moleculares, que posteriormente, conducen a un estado macroscópico coherente anti simétrico. El campo magnético externo puede amplificarse en un flujo turbulento y los rotores moleculares no regresan al estado fundamental coherente simétrico hasta que el efecto desaparezca.

Cefalas *et al.* (2008) plantearon que, durante el flujo turbulento del líquido, la fluctuación electromagnética puede amplificarse o descargarse durante un tiempo definido. Esto debido a que las líneas magnéticas siguen la dirección del flujo del líquido y que la acción del campo magnético es proporcional al alcance de dichas líneas (Chibowski y Szcześ, 2018). En el caso del flujo turbulento si las líneas magnéticas se extienden a lo largo de un flujo local, el CM se fortalece. Por lo tanto, durante el flujo turbulento puede ocurrir un aumento o disminución espontánea de la amplificación magnética. Para investigar el problema a nivel molecular, se aplicó un modelo mecánico cuántico que predice, que las fluctuaciones magnéticas dentro de un líquido pueden amplificarse intercambiando energía con un campo magnético externo a través del momento angular de los rotores moleculares del agua y con el momento angular macroscópico del flujo turbulento. El modelo teórico indica que la ganancia de energía es alta cuando el CM está en resonancia con las frecuencias de rotación de los rotores moleculares y del flujo turbulento (Cefalas *et al.*, 2008). En el caso de las partículas QED, la teoría cuántica de campos de la electrodinámica (interacciones de luz y materia) es la que conduce a lograr una relación total entre la mecánica cuántica y la relatividad espacial (Chibowski y Szcześ, 2018).

El enfoque de rotores moleculares se basa en la teoría cuántica de la amplificación de microondas por emisión estimulada de radiación (MASER) (Cefalas *et al.*, 2008). La teoría considera que el vacío posee las mismas propiedades que una partícula, es decir, spin, polarización de la luz, energía; sin embargo, la mayoría de estas propiedades se cancela, dejando al vacío en un estado cuántico con la menor energía posible. Este es un caso especial de energía de punto cero que se relaciona con el vacío cuántico (Chibowski y Szcześ, 2018). Esto significa que las fluctuaciones magnéticas dentro del flujo turbulento se podrían amplificar por un corto período de tiempo intercambiando su energía con la energía cinética de los rotores moleculares. El estado amplificado se mantiene en un estado coherente antisimétrico y no decae a su estado coherente simétrico porque la transición está restringida. El CM se amplifica proporcionalmente a la energía cinética del flujo (Cefalas *et al.*, 2008).

Los resultados experimentales de Cefalas *et al.* (2008, 2010), así como los de Knez y Pohar (2005) apoyan el mecanismo propuesto. La transición de fase del cristal

magnético calcita/aragonita, se debe al estado coherente antisimétrico creado por el CM a partir de un gran número de rotores moleculares.

Puede encontrarse una discusión detallada de los efectos anteriores y las derivaciones del modelo cuántico en los trabajos de Kobe *et al.* (2003) y Cefalas *et al.* (2010, 2008), que se basan en el acoplamiento y la transferencia de energía, flujo turbulento, campo magnético y rotor molecular.

Altos gradientes de un campo magnético débil: teoría de la formación de un líquido ordenado dinámicamente como polímeros de oxianión (DOLLOP)

Esta es la teoría más avanzada para explicar el mecanismo de acción de un CM en soluciones acuosas en las que tiene lugar la precipitación. Coey (2012) propuso este nuevo enfoque para explicar los efectos de un CM sobre la precipitación de CaCO_3 . Se basa en la teoría no clásica del proceso de nucleación, que considera la presencia de clústers de pre-nucleación, con características similares a los líquidos, y que son termodinámicamente estables en soluciones con CaCO_3 ; los iones presentes en las estructuras estables de pre-nucleación se encuentran hidratados.

Según Coey (2012), en la teoría clásica de nucleación, los iones disueltos deben obtener energía de activación para formar pequeñas semillas, cuya formación depende de las fluctuaciones aleatorias de la concentración local. Debido a que el CM normalmente interactúa con soluciones insaturadas, la vida útil del núcleo en el enfoque clásico es de magnitud más corta que el tiempo transcurrido entre el tratamiento y la precipitación.

A partir de la dinámica molecular, los resultados indican que los clústers son polímeros iónicos flexibles desordenados de manera aleatoria cuyo radio de giro puede cambiar incluso hasta dos veces con un consumo de energía muy bajo, menor que la energía térmica ambiental (Coey, 2012). Tales clústers de pre-nucleación estables de CaCO_3 se descubrieron mediante ultra-centrifugación analítica (Gebauer *et al.*, 2008) y microscopía electrónica de transmisión criogénica (Pouget *et al.*, 2009). Los clústers de pre-nucleación son parecidos a cadenas cortas constituidas por iones de calcio y bicarbonato. A medida que estos iones ingresan a la zona influenciada por el CM, se

empujan en direcciones opuestas debido a sus cargas. En este proceso el Ca^{2+} se mueve hacia la superficie del clúster (Coey, 2012).

Los iones HCO_3^- y Ca^{2+} presentes en la solución forman grupos, de tal manera que un lado está cargado negativamente con los aniones HCO_3^- , mientras que el lado opuesto está cargado positivamente con los cationes de Ca^{2+} . Los clústers se harán más grandes si en el lado negativo el H^+ es reemplazado por Ca^{2+} . La fuerza motriz de este proceso puede originarse a partir de un CM no homogéneo que causa una interconversión de los espines electrónicos de los H^+ presentes en el HCO_3^- , produciendo que el par iónico resultante fluctúe entre estados singlete-triplete. La dimerización de los H^+ a partir del HCO_3^- dentro de los clústers de pre-nucleación parece ser una condición necesaria para la modificación de larga duración. El estado de conversión singlete-triplete del H^+ con respecto al CO_3^{2-} así como los movimientos del par iónico Ca^{2+} y HCO_3^- hacia direcciones opuestas, causan cambios termodinámicos en los clústers de pre-nucleación, produciendo modificaciones en los procesos de nucleación y cristalización y, en consecuencia, modifican las fases precipitadas del CaCO_3 (Coey, 2012).

1.3.5. Efectos de los CM's en las propiedades del agua

Se han realizado varios estudios para medir los efectos de un CM sobre las propiedades fisicoquímicas del agua, como la conductividad eléctrica (CE), el pH, la tensión superficial, la tasa de evaporación, el punto de ebullición, etc. Sin embargo, la mayoría de los resultados obtenidos en estos trabajos, no son consistentes entre sí, y más en variables como la CE y el pH, lo que conlleva a que los efectos observados sean cuestionables, a pesar de los beneficios que se han reportado por varios investigadores (Hachicha *et al.*, 2018; Haq *et al.*, 2016; Grewal y Maheshwari, 2011). Según la información consultada, estas inconsistencias entre los efectos observados se deben a la metodología y los equipos utilizados para medir las propiedades del agua que son de interés para el investigador. A pesar de estas desventajas, es posible rescatar información de algunos trabajos que tienen alta confiabilidad y consistencia entre sí (Wang *et al.*, 2018; Ben *et al.*, 2017; Seyfi *et al.*, 2017), dando un mayor sustento a los efectos producidos en el agua por la acción de un CM.

Ben *et al.* (2017) publicaron resultados de la acción de los CM's sobre el agua utilizando diferentes intensidades de flujo magnético (90, 330, 290 y 500 mT). Determinaron la tasa de evaporación del agua a varias temperaturas y la tensión superficial. Las muestras de agua se evaporaron durante 1 hora a una temperatura específica. Los autores observaron un aumento en la cantidad de agua evaporada y una disminución de la tensión superficial en comparación con el testigo. La evaporación máxima apareció para las muestras tratadas con 290 mT y 330 mT. Encontraron estadísticamente que un 24% de disminución en la tensión superficial dio como resultado un 42% de aumento en la evaporación a 80 °C.

Resultados similares fueron obtenidos por Wang *et al.* (2018) que evaluaron el efecto de un CM sobre las propiedades físicas y encontraron que a una intensidad de 300 mT el agua presentó un aumento en la evaporación y una disminución del calor específico y el punto de ebullición. Los autores sugieren que bajo las condiciones en las que se desarrolló el experimento, la intensidad de 300 mT es el valor óptimo para que se alcance el efecto máximo de la magnetización. El aumento en la tasa de evaporación por acción de un CM también ha sido reportado por Szcześ *et al.* (2011), Holysz *et al.* (2007) y Nakagawa (1999).

Seyfi *et al.* (2017) realizaron un trabajo considerando la energía cinética de las moléculas de agua y la fuerza de Lorentz como factores que actúan sobre el movimiento de las moléculas que se encuentran en la interfaz agua-aire, causando el debilitamiento o incluso la ruptura de los puentes de hidrógeno. Los autores realizaron experimentos utilizando uno, dos y tres imanes de ferrita en forma de anillo con intensidades de flujo magnético de 44-55 mT, 55-70 mT y 75-100 mT, respectivamente. La muestra de agua se colocó en el centro del imán o imanes. El CM fue dirigido perpendicularmente a la superficie del agua en la muestra (polos N-S conectados). Durante el experimento en un lapso de 80 minutos, la diferencia en el agua evaporada con respecto a la muestra no tratada aumentó linealmente y al final del experimento ascendió a 6.3, 13.9 y 18.9%, a 31 ± 1 °C, respectivamente. Sin embargo, no se observó ningún efecto si el CM se aplicaba tangencialmente a la superficie del agua (2 polos N-N conectados).

Del mismo modo, Cai *et al.* (2009) observaron una disminución de la tensión superficial y un aumento en la viscosidad del agua a 298 K a un flujo constante (1 m/s) después de aplicar un CM de 500 mT. Un incremento en la viscosidad también ha sido reportado por Toledo *et al.* (2008).

Los experimentos de Xiao y Bo (2008) indican que un CM de 440 mT produce aumentos en el grado de humedecimiento en algunos materiales (cobre, grafito, muscovita y sílica gel), disminución de la tensión superficial, disminución de la viscosidad e incrementos en el índice de refracción y la constante dieléctrica del agua.

Como se puede observar en estos trabajos, el efecto de un CM sobre el agua tiene un carácter complejo y multifactorial, que da como resultado, alteraciones en las propiedades fisicoquímicas del agua y los iones disueltos (Mosin e Ignatov, 2014). Sin embargo, los hallazgos de Otsuka y Ozeki (2006) mostraron que incluso un CM constante fuerte (2-6 T) no cambia las propiedades del agua pura destilada. Observaron que cuando se disolvió oxígeno (99.99% de pureza) en el agua, los efectos de un CM fueron mayores, afectando significativamente sus propiedades.

1.3.6. Efectos del agua y soluciones nutritivas magnetizadas en los cultivos

Numerosos estudios han reportado los efectos del uso de agua tratada magnéticamente sobre los cultivos bajo una serie de condiciones agrícolas. De acuerdo a los resultados de estos trabajos, el tratamiento magnético del agua puede estimular procesos bioquímicos y fisiológicos en varias especies vegetales que se reflejan en aumentos en el crecimiento (biomasa fresca y seca), concentraciones nutrimentales y de metabolitos, actividad enzimática, actividad fotosintética, rendimiento, etc (Hachicha *et al.*, 2018; Surendran *et al.*, 2016; Haq *et al.*, 2016; Grewal y Maheshwari, 2011). Sin embargo, a pesar de la cantidad de información disponible sobre estos efectos observados en los cultivos, el tema sigue siendo controvertido entre la comunidad científica, debido principalmente a la falta de consistencia entre los resultados, así como en las metodologías utilizadas, ya que, en algunos casos, los experimentos no son reproducibles. A pesar de las limitantes en estos estudios, existen trabajos bien sustentados y estructurados que pueden servir de base para nuevas investigaciones y

cuyos resultados provienen de un análisis riguroso, tal como lo exige el método científico, dando a este tipo de información relevancia, confiabilidad y consistencia.

Hachicha *et al.* (2018) estudiaron el efecto del tratamiento electromagnético de agua salina en la germinación de semillas de maíz y rendimiento de papa utilizando un dispositivo electromagnético denominado Aqua 4D. Los resultados mostraron un aumento significativo en la tasa de germinación de semillas de maíz regadas con agua salina ($4 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$) tratada electromagnéticamente durante 15 minutos. Para el cultivo de papa, el uso de agua salina tratada, produjo aumentos significativos en el rendimiento del tubérculo, en la absorción de N, P y K en los tejidos y una disminución de los efectos adversos producidos por el uso de agua salina. Los resultados también mostraron una disminución significativa de la salinidad del suelo, específicamente en las concentraciones de Na y Cl.

Surendran *et al.* (2016) evaluaron el tratamiento magnético del agua de riego en el crecimiento y rendimiento de caupí en maceta y berenjena en campo abierto. También evaluaron el efecto sobre las propiedades del agua y la humedad del suelo. Los tratamientos probados fueron agua potable, agua dura 150 y $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ y agua salina 500 , 1000 y $2000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de sólidos disueltos totales (TDS). Las concentraciones requeridas de agua dura y agua salina se prepararon utilizando productos químicos estándar de Merck. Se usaron dos imanes permanentes con la fuerza de $180\text{-}200 \text{ mT}$. Los resultados mostraron que el tratamiento magnético condujo a una mejora en el crecimiento del cultivo y un aumento en el rendimiento del caupí. En el experimento con berenjena, observaron que el tratamiento magnético del agua normal y salina aumentó significativamente el rendimiento. Los autores también encontraron que el CM produjo una reducción de la CE en todas las fuentes de agua utilizadas, excepto la potable, mientras que el pH aumentó. Este efecto se perdió después de 108 h . Asimismo se propició un mayor contenido de humedad en el suelo en los tratamientos con agua magnetizada en comparación con los tratamientos no tratados para el segundo y tercer día después del riego. El incremento en la capacidad de retención de humedad del suelo indicada por el trabajo de Surendran *et al.* (2016) también fue demostrado en un estudio realizado por Mostafazadeh *et al.* (2011). Los investigadores evaluaron el patrón de distribución de la humedad en el suelo de un sistema de riego por goteo

después de 24 horas utilizando agua magnetizada y no magnetizada y tres niveles de concentración de CaCO_3 (0, 200 y 400 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). Los resultados mostraron que en los tratamientos con agua magnetizada los contenidos medios de humedad del suelo a profundidades de 0-20, 20-40 y 40-60 cm por debajo del emisor fueron estadísticamente más altos que en los tratamientos con agua no tratada. En este estudio no se encontró interacción entre los niveles de calcio y de agua magnetizada.

Haq *et al.* (2016) determinaron el efecto en nabo utilizando una solución nutritiva tratada magnéticamente. Estudiaron la germinación de las semillas, el crecimiento de las plántulas, contenido de clorofila y las actividades enzimáticas en condiciones de hidroponía (solución de Hoagland al 50%). Se utilizó agua potable y un CM de 211 mT aplicado a 30, 45 y 60 min. Los resultados mostraron que los tratamientos con solución magnetizada aumentaron la germinación, el índice de emergencia, el índice de vigor, longitud de plántulas, pesos frescos y secos, contenido de clorofila y contenido proteico. Se incrementaron las actividades enzimáticas de la α -amilasa y la proteasa durante la germinación. También hubo cambios en algunas características del agua utilizada, se mejoró la calidad del agua, disminuyendo los sólidos disueltos totales, la relación de adsorción de sodio, bacterias y coliformes totales y aumentando el oxígeno disuelto, el carbonato de sodio residual y el pH.

El Sayed y El Sayed (2014) llevaron a cabo dos experimentos en macetas en condiciones de invernadero e hidroponía (solución nutritiva de Hoagland) durante el periodo 2010-2011 con la finalidad de estudiar el impacto del agua magnetizada en el crecimiento, en la concentración de algunos metabolitos y en el rendimiento en plantas de haba, utilizando un dispositivo magnético (Magnetic Funnel - Magnetic Technologies Dubai, UAE, LLC. Patent No. 1826921). En este estudio se reportaron aumentos significativos en la altura de planta, peso fresco y seco de hojas, tallo y raíz, y en el área foliar, por efecto del agua magnetizada. También observaron aumentos significativos en la cantidad de pigmentos fotosintéticos (clorofila a, clorofila b y carotenoides), actividad fotosintética, carbohidratos totales disponibles (monosacáridos, disacáridos, polisacáridos), proteína total, aminoácidos totales, prolina, fenoles totales, contenidos de ácido nucleico (ADN y ARN), ácido giberélico y kinetina, actividad enzimática antioxidante (catalasa, peroxidasa y superóxido dismutasa) y en la concentración K, Ca

y P en raíces, tallos, hojas y semillas. Moussa (2011) utilizó un dispositivo similar (Magnetic Technologies LCC) para magnetizar el agua de riego (30 mT) en plantas de frijol bajo condiciones controladas en cámaras de crecimiento. Reportó aumentos significativos en peso fresco y seco de hojas, tallo y raíz como resultado del uso de agua tratada, incrementos en los contenidos de pigmentos fotosintéticos (clorofila a, clorofila b y carotenoides), ácido giberélico, kinetina, aumento en la actividad de enzimas antioxidantes (catalasa, peroxidasa y superóxido dismutasa) y en la eficiencia en la translocación de los fotosintatos.

Grewal y Maheshwari (2011) estudiaron el efecto del tratamiento magnético del agua y en semillas de chícharo y garbanzo a una intensidad de 3.5-163 mT. Los resultados mostraron que, en ambas especies, el agua magnetizada condujo a un aumento significativo en el índice de emergencia, peso seco de tallo y en el contenido de N, K, Ca, Mg, S, Na, Zn, Fe y Mn en brotes y raíces en comparación con el testigo. Los autores concluyen el tratamiento magnético del agua tiene el potencial de mejorar la germinación, el crecimiento y los contenidos nutrimentales de las plántulas. Este estudio también informa que el valor de pH disminuyó significativamente por el tratamiento magnético. En 2009, estos autores reportaron los efectos de un CM en chícharo y apio. Utilizaron distintas fuentes de agua: potable, reciclada y agua con distintos niveles de salinidad (NaCl, 500 y 1000 mg·L⁻¹ para chícharo y 1500 y 3000 mg·L⁻¹ para apio) y un dispositivo magnético en el rango de 3.5-163 mT. Los datos obtenidos variaron con el tipo de planta y el tipo de agua de riego utilizada. El uso de agua magnetizada dio como resultado aumentos estadísticamente significativos en el rendimiento y la productividad del agua en las plantas de chícharo y apio, sin embargo, este efecto sólo se observó en agua reciclada y agua con 3000 mg·L⁻¹ NaCl en el caso del apio; agua potable, agua reciclada y agua de 1500 mg·L⁻¹ NaCl para chícharo.

En plantas de jitomate, Selim y El-Nady (2011) observaron que los aumentos más altos en la mayoría de las variables de crecimiento fueron registrados en los tratamientos con agua magnetizada; reportaron incrementos significativos en la altura de la planta, longitud de la raíz, pesos fresco y seco de diferentes órganos, área foliar específica, relación de área foliar, relación de peso foliar e índice de área foliar.

En otro trabajo, Morejón *et al.* (2007) estimularon el proceso de germinación de semillas de *Pinus tropicalis* M. utilizando agua tratada con un CM de 120 mT. El tratamiento magnético se realizó de dos maneras, agua en reposo (estática) y agua en flujo (dinámica). Los datos obtenidos mostraron que al utilizar agua magnetizada se produjo un aumento significativo en el porcentaje de germinación con respecto a las semillas control. Los valores más altos de esta variable se obtuvieron al utilizar agua magnetizada dinámicamente. También se observó un mayor crecimiento de plántulas después de la germinación.

De acuerdo a los resultados de los trabajos aquí expuestos es evidente que existen efectos potenciales y beneficiosos en las plantas por el uso de agua y soluciones nutritivas tratadas magnéticamente. Por lo tanto, el tratamiento magnético podría ser una técnica prometedora para mejorar la producción de cultivos de interés económico en los sistemas de producción agrícola en donde sea factible su aplicación.

1.4. Termodinámica de las soluciones nutritivas

1.4.1. Introducción

La producción de cultivos hidropónicos ha aumentado significativamente en los últimos años en todo el mundo, ya que permite aprovechar al máximo los recursos hídricos y los fertilizantes (Trejo y Gómez, 2012). Es un sistema de producción que requiere un abastecimiento continuo de nutrimentos a través de una solución nutritiva (SN), la cual contiene los elementos esenciales para el desarrollo óptimo de las plantas (Favela *et al.* 2006).

La solución nutritiva se considera uno de los factores más importantes del rendimiento y la calidad del cultivo (Trejo y Gómez, 2012). Además, es muy útil para la investigación, ya que permite tener un control riguroso de los nutrimentos que se estén evaluando, así como de los elementos no esenciales presentes en el agua (Favela *et al.* 2006).

1.4.2. Solución nutritiva

Una solución nutritiva en hidroponia, es una solución acuosa que contiene iones inorgánicos provenientes de sales solubles (fertilizantes), los cuales proveen a las plantas de elementos esenciales; compuestos orgánicos como los quelatos pueden estar presentes en una SN (Trejo y Gómez, 2012).

El término elemento esencial fue propuesto por Arnon y Stout en 1934. Estos investigadores propusieron que para que un elemento pueda ser considerado esencial debe cumplir los siguientes criterios: 1) en ausencia del elemento la planta es incapaz de completar su ciclo normal de vida; 2) la función que realiza dicho elemento no puede ser desempeñada por ningún otro elemento; y 3) el elemento debe estar directamente involucrado en algún proceso metabólico en la planta o bien ser necesario en una fase metabólica específica (Ázcon y Talón, 2013). Aunado a esto, de acuerdo a Baset (2015), cualquier elemento categorizado como esencial debe satisfacer estos tres criterios en una amplia gama de especies vegetales y no en una especie específica o una condición ambiental particular.

Actualmente, se consideran 17 elementos esenciales para la mayoría de las plantas. Estos son C, H, O, N, F, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Zn, Mn, Mo, B, Cl y Ni (Ázcon y Talón,

2013). Con la excepción del C y el O, que se suministran desde la atmósfera, los elementos esenciales se obtienen del medio de crecimiento (Trejo y Gómez, 2012). Otros elementos como el Na, Si, V, Se, Co, Al, I, entre otros, se consideran beneficiosos, debido a que pueden estimular el crecimiento, compensar los efectos tóxicos de otros elementos o reemplazar a los elementos esenciales al menos en una función específica (Ázcon y Talón, 2013; Trejo y Gómez, 2012).

Tradicionalmente, los elementos esenciales se dividen en dos grupos: a) macronutrientes, y b) micronutrientes, elementos traza u oligoelementos. Esta distinción no tiene implicación cualitativa, ya que todos ellos son igualmente esenciales, sino que refleja, exclusivamente, las concentraciones relativas halladas en los tejidos o las concentraciones que son necesarias en las soluciones nutritivas. Los elementos N, P, K, S, Ca, y Mg constituyen, junto con C, H y O, la totalidad de macronutrientes, y su nombre hace referencia a que se necesitan en grandes cantidades; su presencia en los tejidos está por encima del 0.1%. Los ocho elementos esenciales restantes Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Cl y Ni, se agrupan bajo la denominación de micronutrientes y su concentración en los tejidos es inferior al 0.1% (Ázcon y Talón, 2013).

En la actualidad, se consideran seis macronutrientes y seis micronutrientes para la elaboración de soluciones nutritivas: N, P, S, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, B, Cu y Mo (Sonneveld & Voogt, 2009). Para el caso del primer grupo de nutrientes, Steiner creó el concepto de relación mutua iónica que se basa en la relación mutua de aniones NO_3^- , H_2PO_4^- y SO_4^{2-} , y la relación mutua de cationes K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} . Tales relaciones no se tratan solo de la cantidad total de cada ion en la solución, sino de la relación cuantitativa que mantiene unidos a los iones, ya que, si se produce una relación inadecuada entre ellos, la SN puede verse afectada negativamente (Steiner, 1961).

Steiner (1984, 1961) plantea las relaciones mutuas iónicas de una SN como proporciones relativas con respecto a una concentración equivalente total, asimismo sugiere, que para un crecimiento y desarrollo adecuado de los cultivos se deben considerar los siguientes intervalos de proporciones equivalentes porcentuales de aniones y cationes: NO_3^- , 50-70%; H_2PO_4^- , 3-20%; SO_4^{2-} , 25-40%; K^+ , 30-40%; Ca^{2+} , 35-55% y Mg^{2+} , 15-30%.

Desde este punto de vista, un cambio en la concentración de un ion debe ir acompañado de un cambio correspondiente de otro ion de carga opuesta para cumplir con el principio de electroneutralidad (Hewitt, 1966), por lo que la restricción del equilibrio iónico hace que sea imposible suministrar un ion sin introducir un contraión (Trejo y Gómez, 2012). De esta manera, la composición nutrimental de una SN determina la concentración iónica total, la cual, correlaciona la conductividad eléctrica (CE) de la solución con su presión osmótica (Favela *et al*, 2006; Urrestarazu, 2004).

Los factores que son importantes en la formulación de las SN's son: el pH, que determina la disponibilidad de los nutrimentos en el medio de crecimiento, así como la capacidad buffer de la solución (Urrestarazu, 2004); la CE, que refleja la concentración total de los nutrimentos (Favela *et al*, 2006); y las relaciones mutuas entre los aniones y los cationes, que proporcionan el balance químico nutrimental más adecuado para el desarrollo óptimo de un cultivo (Steiner, 1984). Debido a su relevancia en las SN's, actualmente se han anexado otros factores como la temperatura y la concentración de oxígeno (Trejo y Gómez, 2012).

1.4.3. Termodinámica del balance nutrimental de la solución de la rizósfera

Para este análisis, primeramente, es necesario establecer los sistemas en equilibrio a estudiar. El sistema A o sistema SNS (solución nutritiva - sustrato) y el sistema B o sistema MR (membrana - raíz). El primer sistema hace referencia a la solución nutritiva total que se encuentra retenida por el sustrato pero que aún no está en contacto con la raíz de la planta. El segundo sistema se define como la cantidad total de membranas celulares que se encuentran en la raíz que aún no están en contacto con la solución nutritiva. Los sistemas A y B se consideran sistemas abiertos ya que pueden intercambiar materia y energía con el medio. A pesar de que cada sistema está en equilibrio, las condiciones no son iguales en los dos sistemas, es decir, el estado termodinámico en el que se encuentra cada uno es distinto, por lo que el sistema A no está en equilibrio con el sistema B. Si estos sistemas entraran en interacción, el resultado sería un sistema C que estaría compuesto por el sistema A y el sistema B. Al sistema C también se le puede denominar sistema SMR (solución - membrana - raíz).

En este punto, el sistema A y el sistema B están en equilibrio con el sistema C y de acuerdo a la ley cero de la termodinámica los sistemas A y B también lo están (Atkins y De Paula, 2008; Chang, 2008). El sistema C representaría entonces el equilibrio que produce la planta en el medio en el que se desarrolla. A una escala real y en particular en cultivos bajo condiciones controladas, estas nuevas condiciones de equilibrio pueden ser censadas a través de la solución nutritiva de la rizósfera. Por lo tanto, esta solución es considerada como una solución en equilibrio termodinámico resultado de la interacción entre el sistema SNS y el sistema MR, o bien, del sistema SMR (Chang, 2008; Steiner, 1961).

Pineda *et al.* (2008) mencionan que la nutrición vegetal es un componente fundamental en la producción, calidad y rentabilidad de un cultivo, que debe ser ajustada y recomendada para cada especie cultivable con base en sus respectivas curvas de extracción nutrimental. Sin embargo, los requerimientos nutrimentales de los cultivos no son el único factor determinante para una nutrición exitosa, lo es también el balance nutrimental, es decir, las relaciones que guardan los nutrimentos entre sí.

Steiner (1984) a través de los fundamentos de su método universal para la formulación de soluciones nutritivas plantea una gran aproximación sobre la definición de balance nutrimental. Para Steiner (1968, 1961) las proporciones relativas de los nutrimentos con respecto a una concentración equivalente total es la representación del balance de una solución nutritiva. El autor menciona que las relaciones porcentuales de cada nutrimento son los factores determinantes en la nutrición del cultivo y no las concentraciones absolutas. Así, el balance óptimo puede expresarse en términos de una suma y una relación. Se estableció como balances críticos de una solución nutritiva las relaciones que se establecen entre cationes y entre aniones, donde uno de los más importantes a considerar es la relación Ca/Mg/K, ya que cuando estos nutrimentos no están en equilibrio, el estrés producido en la planta es muy alto.

Steiner (1984) plantea la solución nutritiva en términos porcentuales para cationes y aniones respectivamente, de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\text{Balance catiónico} &= a \text{Ca}^{2+} + b \text{Mg}^{2+} + c \text{K}^{+} + d \text{NH}_4^{+} = 100 \% \\ \text{Balance aniónico} &= e \text{NO}_3^{-} + f \text{H}_2\text{PO}_4^{-} + g \text{SO}_4^{2-} = 100 \%\end{aligned}$$

Dónde: a, b, c, d, e, f y g, son las proporciones relativas de los iones presentes en la solución nutritiva.

De acuerdo a Steiner (1961) estas relaciones se pueden expresar en cualquier unidad de concentración. Sugiere el uso de meq·L⁻¹ ya que son más fáciles de manejar al momento de realizar los ajustes de pH en la solución nutritiva.

Con base a lo establecido en el sistema SMR y a lo propuesto por Steiner (1961), la solución de la rizósfera sería la solución ideal para analizar el equilibrio químico de los nutrimentos. Según Steiner (1980), las plantas pueden ajustarse a las proporciones relativas de cationes y aniones que no son propias de sus características de absorción normales, es decir, las plantas pueden ajustar el balance iónico de la solución nutritiva aplicada a un balance que es propio de cada especie vegetal. Por lo tanto, la solución de la rizósfera, producto de este ajuste vegetal, proporcionará información relevante sobre las condiciones ideales del equilibrio nutrimental o iónico para el cultivo.

Este balance, desde un punto de vista termodinámico, representa la condición nutrimental ideal, en la cual la planta, requiere invertir la mínima energía para realizar ajustes al balance nutrimental presente en su medio de crecimiento (Benton, 2005). Esta afirmación es meramente teórica ya que en condiciones de cultivo reales difícilmente se puede obtener el mismo balance en todas las plantas de una especie en particular, por lo que la condición ideal del equilibrio nutrimental en realidad es una condición promedio (Steiner, 1961).

Para dar un sustento más sólido a estas afirmaciones será necesario analizar la condición nutrimental ideal. A partir del concepto de balance de Steiner (1984) se establece el siguiente equilibrio que representa el balance nutrimental ideal de un cultivo:

$$a[Ca^{2+}] + b[Mg^{2+}] + c[K^+] + d[NH_4^+] + e[NO_3^-] + f[H_2PO_4^-] + g[SO_4^{2-}] = 0 \quad \text{.....Ec.1.3.1.}$$

Dónde: a, b, c, d, e, f y g, son las proporciones relativas de las concentraciones iónicas expresadas en meq·L⁻¹.

De acuerdo a Bohn *et al.* (2001) en una solución electrolítica, las interacciones de los iones con las moléculas de agua y otros iones afectan las propiedades coligativas de una solución que dependen de la concentración. Por lo tanto, la suma de todas las concentraciones iónicas determinará el efecto total sobre estas propiedades, que incluyen la presión osmótica, el punto de ebullición, el punto de congelamiento y el potencial químico (Bohn *et al.*, 2001). Las fuerzas electrostáticas de atracción y repulsión resultantes de estas interacciones pueden ser despreciables cuando se trata de soluciones de dilución infinita, bajo esta condición, el efecto producido en la solución por unidad de concentración es el mismo en todos los iones presentes, es decir, los iones tienen un comportamiento ideal (Tan, 2011). Sin embargo, a diferencia de las soluciones no electrolíticas, la mayoría de las soluciones electrolíticas se comportan de manera no ideal, la razón es que en general las fuerzas intermoleculares entre especies químicas dependen de la distancia entre ellas. Esta dependencia significa que incluso en soluciones muy diluidas las fuerzas electrostáticas que ejercen los iones entre sí, son suficientes para causar una desviación del comportamiento ideal, como resultado, el efecto producido en una solución por unidad de concentración se vuelve distinto en todos los iones (Chang, 2008).

Estas desviaciones pueden corregirse con un factor denominado coeficiente de actividad γ (Bohn *et al.*, 2001). La teoría de Debye-Hückel permite calcular el valor γ de cada ion presente a partir de las propiedades de la solución. Esta teoría desarrollada por Peter Debye y Eric Hückel en 1923, es un concepto que explica el comportamiento de las soluciones iónicas, en las que las fluctuaciones del potencial eléctrico debido a los iones son prácticamente muy pequeñas (Tan, 2011). De esta manera, la concentración absoluta de las especies iónicas se convierte en una concentración efectiva también denominada actividad química, la cual se expresa en mol·L⁻¹ (Chang, 2008).

Bohn *et al.* (2001) establece que un soluto ideal tiene un coeficiente de actividad igual a la unidad. La desviación del coeficiente de actividad con respecto a este valor expresa el grado de desviación del comportamiento ideal, por lo que:

$$\lim_{M \rightarrow 0} \gamma = 1 \quad \dots\dots\dots \text{Ec.1.3.2.}$$

Esto indica que a medida que la concentración molar se aproxima a cero, γ se aproxima al límite de la unidad. Es decir, a medida que el soluto se diluye en el disolvente y sus iones se alejan cada vez más, interactúan menos entre sí y se comportan de una manera más ideal (Bohn *et al.*, 2001).

El coeficiente de actividad iónica se calcula con la ecuación de Debye-Hückel (1923):

$$-\log_{10} \gamma_i = -A Z_i^2 \frac{I^{1/2}}{1 + B a'_i I^{1/2}} \quad \dots\dots\dots \text{Ec.1.3.3.}$$

Dónde: A y B son constantes del agua que están en función de la temperatura a 1 atm de presión, para soluciones acuosas a 25 °C los valores de A y B son 0.5085 y 0.3281 respectivamente; Z es la valencia; I es la fuerza iónica; a'_i es el diámetro efectivo del ion y el subíndice i es la especie iónica.

El término fuerza iónica I, se usa como una medida de la fuerza de las concentraciones iónicas en la solución. Según Tan (2011), el concepto fue introducido por Lewis y Randall en 1921 para evaluar el efecto combinado de las actividades de varios electrolitos en solución sobre un electrolito específico. Se calcula con la fórmula:

$$I = \frac{1}{2} \sum M_i Z_i^2 \quad \dots\dots\dots \text{Ec.1.3.4.}$$

Dónde: M es la molaridad; Z es la valencia y el subíndice i es la especie iónica.

En el Cuadro 1.3.1 se muestran los diámetros efectivos de algunos iones y sus coeficientes de actividad respectivos para distintas fuerzas iónicas. De acuerdo a los

valores de los coeficientes, se puede observar que las desviaciones del comportamiento ideal aumentan conforme incrementa la fuerza iónica, siendo los iones trivalentes los que presentan una mayor desviación, seguido por los iones divalentes y finalmente los monovalentes (Tan, 2011).

Cuadro 1.4.1. Coeficientes de actividad a distintas fuerzas iónicas.

Catión	a'(nm)	Fuerza iónica I (mol L ⁻¹)				
		0.001	0.005	0.01	0.05	0.1
Ca ²⁺	0.60	0.870	0.749	0.765	0.485	0.405
Mg ²⁺	0.80	0.872	0.755	0.690	0.520	0.450
K ⁺	0.30	0.964	0.925	0.899	0.805	0.755
NH ₄ ⁺	0.25	0.964	0.924	0.898	0.800	0.750
NO ₃ ⁻	0.30	0.964	0.925	0.899	0.805	0.755
H ₂ PO ₄ ⁻	0.40	0.964	0.927	0.901	0.815	0.770
SO ₄ ²⁻	0.40	0.867	0.740	0.660	0.455	0.355
Fe ²⁺	0.60	0.870	0.749	0.765	0.485	0.405
Fe ³⁺	0.90	0.730	0.540	0.445	0.245	0.180
Cu ²⁺	0.60	0.870	0.749	0.765	0.485	0.405
Zn ²⁺	0.60	0.870	0.749	0.765	0.485	0.405
MnO ₄ ⁻	0.35	0.964	0.926	0.900	0.810	0.760
MoO ₄ ²⁻	0.45	0.867	0.742	0.665	0.455	0.370
Ni ²⁺	0.60	0.870	0.749	0.765	0.485	0.405
Na ⁺	0.45	0.964	0.928	0.902	0.820	0.775
Al ³⁺	0.90	0.730	0.540	0.445	0.245	0.180

Fuente: Tan, 2011.

Por lo tanto, la actividad química se define como (Tan, 2011):

$$a_i = \gamma_i M_i \dots\dots\dots \text{Ec.1.3.5.}$$

Dónde: a es la actividad química; γ el coeficiente de actividad; M la molaridad y el subíndice i es la especie iónica.

Con base en lo anterior, el equilibrio del balance nutrimental ideal de la Ec.1.3.1 expresado en términos de meq·L⁻¹ se transforma a mol·L⁻¹. Este cambio en las unidades de concentración no compromete la proporcionalidad del balance, pero sí modifica las proporciones relativas (Steiner, 1961), por lo que:

$$A a_{Ca} + B a_{Mg} + C a_K + D a_{NH_4} + E a_{NO_3} + F a_{H_2PO_4} + G a_{SO_4} = 0 \quad \text{.....Ec.1.3.6.}$$

Dónde: A, B, C, D, F y G son las proporciones relativas de las actividades iónicas expresadas en mol·L⁻¹.

Teóricamente, la actividad química es una unidad equivalente para todos los iones presentes en el agua y cumple con el principio de electroneutralidad (Tan, 2011).

La actividad es un concepto muy importante para las ciencias biológicas ya que de acuerdo a Chang (2008) todos los sistemas biológicos son soluciones acuosas que contienen diversos iones y la estabilidad de las biomacromoléculas y la rapidez de muchas de las reacciones bioquímicas dependen en gran medida del tipo y concentración de los iones presentes. En términos de balance nutricional, la actividad relativa de un nutrimento, puede entenderse como la fuerza relativa que ejerce dicho nutrimento en una solución nutritiva particular.

Ahora bien, en el sistema SMR la solución de la rizósfera está en contacto directo con el sistema MR. Al tratarse de un sistema de membranas es posible utilizar los principios del equilibrio de Donnan. El efecto Donnan, llamado así en honor al químico inglés Frederick G. Donnan, describe la distribución de equilibrio de pequeños iones que se difunden a ambos lados de una membrana que es libremente permeable a estos iones, pero impermeable a iones macromoleculares, en presencia de un electrolito macromolecular en un lado de la membrana (Atkins y De Paula, 2008; Chang, 2008).

En biología, el equilibrio de Donnan se utiliza para estudiar el potencial de membrana, que se define como el potencial eléctrico resultado de la diferencia de concentraciones iónicas que se establecen a través de las membranas celulares de las células vivas, los cuales, son producto de la acción de bombas iónicas, transportadores y canales iónicos ubicados en las membranas (Chang, 2008; Sten-Knudsen, 2007).

El concepto de potencial de membrana se utiliza para el estudio y determinación de la absorción de nutrimentos por las raíces y el transporte de iones de una célula a otra dentro de la planta. Los compartimentos celulares en el tejido vegetal están separados

por membranas biológicas que representan barreras para los iones presentes en el medio. El transporte a través de estas barreras y los procesos que lo regulan pueden estudiarse y describirse utilizando potenciales químicos (Tan, 2011).

Willard Gibbs (1839 - 1903) introdujo el concepto de potencial químico μ y lo definió como un cambio de energía libre (G) de la masa dividido por la cantidad de soluto añadido (n). Chang (2008) expresa μ con la siguiente ecuación diferencial:

$$\mu = dG = \left(\frac{\partial G}{\partial n} \right)_{T, P, n_j} \dots\dots\dots \text{Ec.1.3.7.}$$

El potencial químico, depende de la presión P, la temperatura T, la naturaleza química de la especie iónica y su relación con otras especies químicas (Tan, 2011).

Para soluciones no ideales, la fisicoquímica plantea el potencial químico de la siguiente manera (Tan, 2011):

$$\mu = \mu^0 + R T \ln a \dots\dots\dots \text{Ec.1.3.8.}$$

Dónde: μ es el potencial químico de una especie iónica; μ^0 es el potencial químico de las especies iónicas en estado estándar; R es la constante de los gases ideales, 8.3145 J K⁻¹ mol⁻¹; T es la temperatura absoluta K, 273.15; y a son las actividades de las especies iónicas de la mezcla, mol·L⁻¹.

El potencial químico hace referencia a la energía potencial de cada especie iónica de una solución. Debido a que los iones son partículas cargadas eléctricamente, el potencial químico se combina con el potencial eléctrico y de acuerdo a Tan (2011) se representa como:

$$E = \mu + z F \Psi \dots\dots\dots \text{Ec.1.3.9.}$$

Dónde: E es el potencial electroquímico; μ es el potencial químico; z es la valencia del ion; F es la constante de Faraday y Ψ es el potencial eléctrico o electrostático.

De esta manera, el potencial electroquímico será el que determine el potencial de membrana. Este potencial se centra en el transporte pasivo de la membrana (difusión y flujo de masa) de pequeñas partículas hidrofílicas por lo que obedece a las leyes físicas y químicas (Tan, 2011). Un ion se mueve de forma pasiva si una fuerza física actúa sobre él; a esta fuerza se le denomina fuerza ion motriz (Ázcon y Talón, 2013). El flujo neto de iones en cualquier dirección se detendrá tan pronto como se alcance un estado de equilibrio. En el equilibrio, el sistema se ajusta a los principios de Donnan (Tan, 2011) que se representan como:

$$(R T \ln a)_{\text{dentro}} + z F \Psi_{\text{dentro}} = (R T \ln a)_{\text{fuera}} + z F \Psi_{\text{fuera}} \quad \text{.....Ec.1.3.10.}$$

$$\Psi_{\text{fuera}} - \Psi_{\text{dentro}} = \left(\frac{R T}{z F} \right) \ln \left(\frac{a_{\text{dentro}}}{a_{\text{fuera}}} \right) \quad \text{.....Ec.1.3.11.}$$

De acuerdo a Tan (2011) a $(\Psi_{\text{fuera}} - \Psi_{\text{dentro}})$ se le denomina potencial de membrana o potencial de Donnan, y al sustituirlo por el símbolo E, la ecuación toma la forma de la ecuación de Nernst:

$$E = \left(\frac{R T}{z F} \right) \ln \left(\frac{a_{\text{dentro}}}{a_{\text{fuera}}} \right) \quad \text{.....Ec.1.3.12.}$$

Ázcon y Talón (2013) mencionan que la diferencia entre el potencial de membrana de las células y el potencial de Nernst para un ion problema definen la fuerza ion motriz.

El transporte pasivo o difusivo de un ion se produce a favor de un gradiente del potencial electroquímico o de la fuerza ion motriz. El transporte pasivo implica, que el ion tiende a acumularse en las células en una concentración próxima al equilibrio para un potencial de membrana determinado. La razón de ello, es que el transporte pasivo tiende a igualar el potencial de Nernst del ion que se mueve con el potencial de membrana. Una variación en la concentración externa o interna determina una nueva reorganización de

las concentraciones a ambos lados de la membrana hasta alcanzar, de nuevo, el equilibrio (Ázcon y Talón, 2013).

En el equilibrio, el potencial químico de los cationes también es igual al potencial químico de los aniones para mantener la electroneutralidad. Por lo tanto:

$$E_{\text{cationes}} = E_{\text{aniones}} \dots\dots\dots \text{Ec.1.3.13.}$$

$$\left(\frac{RT}{zF} \right) \ln \left(\frac{a_{\text{dentro}}}{a_{\text{fuera}}} \right)_{\text{cationes}} = \left(\frac{RT}{zF} \right) \ln \left(\frac{a_{\text{fuera}}}{a_{\text{dentro}}} \right)_{\text{aniones}} \dots \text{Ec.1.3.14.}$$

$$\left(\frac{a_{\text{dentro}}}{a_{\text{fuera}}} \right)_{\text{cationes}} = \left(\frac{a_{\text{fuera}}}{a_{\text{dentro}}} \right)_{\text{aniones}} = \text{constante} \dots\dots\dots \text{Ec.1.3.15.}$$

La última ecuación es válida si se tratan de iones con un comportamiento ideal. Esta condición se cumple para la actividad química. De esta manera, el balance nutrimental de la solución de la rizósfera de la Ec.1.3.6, planteado como actividades iónicas porcentuales, será igual al de las células radicales fisiológicamente activas. Sin embargo, esto es relativo, ya que, en la mayoría de las células vivas metabólicamente activas, no existe equilibrio entre los dos lados de la membrana. El metabolismo consume continuamente iones en el interior y, por lo tanto, interrumpe constantemente la condición de equilibrio que favorece el paso de iones desde el exterior (Tan, 2011).

A pesar de esto, el balance nutrimental de la solución problema, al ser el resultado final de numerosos procesos del sistema SMR, es una excelente aproximación para entender la dinámica de los nutrimentos en las raíces de las plantas, en particular la selectividad iónica de las membranas radicales, ya que la absorción selectiva por el sistema radicular es un proceso importante en los sistemas vegetales (Tan, 2011).

Ya que la actividad química define el potencial químico de cada especie iónica en una solución electrolítica, en condiciones estándar se cumple lo siguiente:

$$\mu = \mu^0 + RT \ln a \dots\dots\dots \text{Ec.1.3.16.}$$

$$\mu^0 - \mu = - R T \ln a \quad \text{.....Ec.1.3.17.}$$

Ya que el término $\mu^0 - \mu$ representa el potencial químico entonces:

$$\Delta G = - R T \ln a \quad \text{.....Ec.1.3.18.}$$

Bohn *et al.* (2001) propone calcular ΔG con la fórmula:

$$\Delta G = - 5.71 \log a \quad \text{.....Ec.1.3.19.}$$

De esta forma, el balance nutrimental ideal de la Ec.1.3.6 que está en términos de actividad química cambia a:

$$\Delta G_{Ca} + \Delta G_{Mg} + \Delta G_K + \Delta G_{NH_4} + \Delta G_{NO_3} + \Delta G_{H_2PO_4} + \Delta G_{SO_4} = 0 \quad \text{.....Ec.1.3.20.}$$

El potencial o la energía libre asociada a cada ion en este equilibrio es propio de cada balance nutrimental. Suponiendo que este balance de energía libre es el ideal para el ambiente iónico de la raíz, de acuerdo a la definición de equilibrio, esta sería la condición en la que la planta requiere invertir la mínima energía para ajustar desequilibrios producidos por uno o más nutrimentos, o bien, el balance nutrimental de máxima eficiencia energética (Chang, 2008; Benton, 2005).

Este balance también puede ser útil para analizar cambios de energía potencial en una solución nutritiva producidos por la influencia de algún factor energético como lo es un campo magnético (CM) (Chibowski y Szcześ, 2018).

De acuerdo a varios investigadores (Silva *et al.*, 2015; Coey, 2012; Higashitani *et al.*, 1993) un CM afecta el proceso de hidratación de los iones en una solución. Mosin e Ignatov (2014) mencionan que la acción de un CM sobre una solución provoca una polarización de los iones disueltos y una alteración de las capas de hidratación, factor que contribuye a la solubilidad de las sales disueltas, la disociación electrolítica, las constantes cinéticas y las velocidades de las reacciones químicas en equilibrio.

Debido a que la actividad química es un concepto que está relacionado directamente con fenómenos de hidratación iónica (Chang, 2008), sería la variable ideal para estudiar los cambios energéticos producidos en una solución nutritiva por efecto de un campo magnético.

Una propiedad física importante de la materia que puede ser útil para el estudio de los efectos de un CM en las soluciones electrolíticas es la susceptibilidad magnética, que se define como la capacidad de inducción magnética que puede presentar un elemento o compuesto en presencia de un campo magnético externo (Haynes *et al.*, 2017). La susceptibilidad magnética se establece con base a la permeabilidad magnética (Tippens, 2011).

La permeabilidad magnética de un material es una propiedad que representa su capacidad para establecer líneas de flujo magnético. Cuanto mayor sea la permeabilidad del material, más líneas de flujo pasarán a través de ella por unidad de área (Tippens, 2011).

En general, los materiales magnéticos se clasifican de acuerdo a su permeabilidad con respecto a la que le corresponde al espacio vacío. La relación entre la permeabilidad del material y la del vacío se llama permeabilidad relativa k_m , la cual es un factor adimensional. Young y Freedman (2009) expresan la permeabilidad magnética de la forma siguiente:

$$\mu' = k_m \mu_o \dots\dots\dots \text{Ec.1.3.21.}$$

Dónde: μ' es la permeabilidad magnética del material; k_m la permeabilidad relativa y μ_o la permeabilidad del espacio libre (vacío),

La cantidad en que la permeabilidad relativa difiere de la unidad es a lo se le denomina susceptibilidad magnética, y se denota con χ_m (Young y Freedman, 2009).

$$\chi_m = k_m - 1 \dots\dots\dots \text{Ec.1.3.22.}$$

La susceptibilidad magnética puede ser de tipo paramagnético y diamagnético. En los materiales paramagnéticos las subcapas electrónicas d y f no están completas, por lo que tienen un momento magnético neto únicamente en presencia de un CM externo, por lo que es mucho más débil que el ferromagnetismo. En el caso de materiales diamagnéticos las subcapas electrónicas están completas y tienen poca respuesta a la aplicación de un CM (Rex y Wolfson, 2011). Aunque el diamagnetismo está presente en la mayoría de la materia, sus efectos son mucho menores que los del paramagnetismo o del ferromagnetismo (Serway y Jewett, 2009).

Haynes *et al.* (2017) plantean la magnetización como un momento magnético por unidad de volumen y representan la susceptibilidad magnética molar χ_m de la siguiente manera:

$$\chi_m = K V_m = K \frac{M}{\rho} \dots\dots\dots \text{Ec.1.3.23.}$$

Dónde: V_m es el volumen molar de la sustancia; K se le denomina susceptibilidad de volumen; M la masa molar y ρ la densidad de la masa. Cuando se utiliza el sistema cgs, las unidades habituales para χ_m son $\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$; las unidades en el SI correspondientes son $\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$.

Los elementos o compuestos diamagnéticos presentan valores negativos de χ_m y su susceptibilidad molar varía solo ligeramente con la temperatura. Los paramagnéticos, por otra parte, tienen valores positivos χ_m y muestran una dependencia de la temperatura mucho más fuerte. La susceptibilidad neta de una sustancia es la suma de las contribuciones paramagnéticas y diamagnéticas, pero la primera casi siempre domina (Haynes *et al.*, 2017).

En el Cuadro 1.3.2, se proporcionan valores de χ_m en $\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ para algunos elementos y compuestos inorgánicos relacionados con los nutrientes esenciales. Todos los valores están referidos a un rango de temperatura de 285 a 300 K.

Cuadro 1.4.2. Susceptibilidad magnética de elementos y compuestos inorgánicos.

Nombre	Fórmula	Fase	$\chi_m/10^{-6}$
Agua	H ₂ O	Sólido	-12.6
Agua	H ₂ O	Líquido	-12.9
Agua	H ₂ O	Gas	-13.1
Amonio	NH ₃	Gas	-16.3
Amonio	NH ₃	Acuoso	-18.3
Nitrato de amonio	NH ₄ NO ₃	Sólido	-33.0
Sulfato de amonio	(NH ₄) ₂ SO ₄	Sólido	-67.0
Calcio	Ca	Sólido	40.0
Hidróxido de calcio	Ca(OH) ₂	Sólido	-22.0
Sulfato de calcio	CaSO ₄	Sólido	-49.7
Cloruro de calcio	CaCl ₂	Sólido	-54.7
Magnesio	Mg	Sólido	13.1
Hidróxido de magnesio	Mg(OH) ₂	Sólido	-22.1
Sulfato de magnesio	MgSO ₄	Sólido	-42.0
Sulfato de magnesio heptahidratado	MgSO ₄ 7H ₂ O	Sólido	-135.7
Cloruro de magnesio	MgCl ₂	Sólido	-47.4
Potasio	K	Sólido	20.8
Hidróxido de potasio	KOH	Acuoso	-22.0
Nitrato de potasio	KNO ₃	Sólido	-33.7
Sulfato de potasio	K ₂ SO ₄	Sólido	-67.0
Cloruro de potasio	KCl	Sólido	-38.8
Ácido nítrico	HNO ₃	Líquido	-19.9
Ácido fosfórico	H ₃ PO ₄	Acuoso	-43.8
Ácido sulfúrico	H ₂ SO ₄	Líquido	-39.0
Hierro	Fe	Sólido	^a
Sulfato de hierro	FeSO ₄	Sólido	12 400
Sulfato de hierro heptahidratado	FeSO ₄ 7H ₂ O	Sólido	11 200
Cobre	Cu	Sólido	-5.5
Sulfato de cobre	CuSO ₄	Sólido	1 330
Sulfato de cobre pentahidratado	CuSO ₄ 5H ₂ O	Sólido	1 460
Zinc	Zn	Sólido	-9.2
Sulfato de zinc	ZnSO ₄	Sólido	-47.8
Sulfato de zinc heptahidratado	ZnSO ₄ 7H ₂ O	Sólido	-138.0
Manganeso	Mn	Sólido	511.0
Sulfato de manganeso	MnSO ₄	Sólido	13 660
Sulfato de manganeso tetrahidratado	MnSO ₄ 4H ₂ O	Sólido	14 600
Molibdeno	Mo	Sólido	72.0
Boro	B	Sólido	-6.7
Níquel	Ni	Sólido	^a
Aluminio	Al	Sólido	16.5
Sodio	Na	Sólido	16.0

Fuente: Haynes *et al.* (2017). ^a ferromagnéticos.

Suponiendo que existiera un CM externo influyendo sobre una solución nutritiva, es muy probable que se produzcan cambios en las propiedades magnéticas de los iones presentes. Si ahora relacionamos la susceptibilidad magnética con la actividad química (Haynes *et al.*, 2017; Bohn *et al.*, 2001), entonces:

$$\chi_i = \chi_m a_i \dots\dots\dots \text{Ec.1.3.24.}$$

Dónde: χ es la susceptibilidad magnética; χ_m la susceptibilidad magnética molar; a la actividad química y el subíndice i la especie iónica.

Retomando la Ec.1.3.6, el equilibrio nutrimental se expresaría de la siguiente manera:

$$\chi_{Ca} + \chi_{Mg} + \chi_K + \chi_{NH_4} + \chi_{NO_3} + \chi_{H_2PO_4} + \chi_{SO_4} = 0 \dots\dots\dots \text{Ec.1.3.25.}$$

La susceptibilidad magnética que se presenta en la Ec.1.3.25 establece un balance indirecto de las propiedades magnéticas de una solución nutritiva. Los cambios a este balance permiten censar efectos de magnetización en los iones disueltos que entran en contacto con un CM externo (Haynes *et al.*, 2017; Bohn *et al.*, 2001).

1.5. Literatura citada

- Alabi, A., Chiesa, M., Garlisi, C. & Palmisano, G. (2015). Advances in anti-scale magnetic water treatment. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 1:408-425.
- Alimi, F., Tlili, M. M., Ben A., M., Maurin, G. & Gabrielli, C. (2009a). Effect of magnetic water treatment on calcium carbonate precipitation: Influence of the pipe material. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 48:1327-1332.
- Alimi, F., Tlili, M. M., Ben A., M., Maurin, G. & Gabrielli, C. (2009b). Influence of magnetic field on calcium carbonate precipitation in the presence of foreign ions. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 45:56-62.
- Almeida C., A., Reis P., J. D, Santos S., S., Vieira De O., T. & Da Costa O., M. (2011). Estudio de la conservación de la papaya (*Carica papaya* L.) asociado a la aplicación de películas comestibles. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 2:49-60.
- Alt, D. S., Doyle, J. W. & Malladi, A. (2017). Nitrogen-source preference in blueberry (*Vaccinium* sp.): enhanced shoot nitrogen assimilation in response to direct supply of nitrate. *Journal of Plant Physiology*, 216:79-87.
- Ambashta, R. D. & Sillanpää, M. (2010). Water purification using magnetic assistance: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 180:38-49.
- Atkins, P. & De Paula, J. (2008) *Física química*. 8va ed. Argentina. Médica Panamericana. 1096 pp.
- Austin, M. E. & Gaines, T. P. (1984). An observation of nutrient levels in old, unfertilized rabbiteye blueberry plants. *Horticultural Science*, 19:417-418.
- Austin, M. E. (1994). *Rabbiteye blueberries: Development, production and marketing*. USA. Florida Science Source. 134 pp.
- Ázcon B., J. & Talón, M. (2013). *Fundamentos de fisiología vegetal*. 2da ed. México. McGraw-Hill Interamericana. 651 pp.
- Baker, J. S. & Judd, S. J. (1996). Magnetic amelioration of scale formation. *Water Research*, 30:247-260.
- Bañados, M. P. (2009). Expanding blueberry production into non-traditional production areas: northern Chile and Argentina, México and Spain. *Acta Horticulturae*, 810:439-445.

- Bañados, M. P. Donnay, D. & Uribe, P. (2007). Poda en verde en arándanos. *Revista Agronómica Forestal*, Núm. 31.
- Baset M., M. A. (2015). *Nutrition of crop plants*. USA. Nova Science Publishers. 187 pp.
- Barett, R. A. & Parsons, S. A. (1998). The influence of magnetic fields on calcium carbonate precipitation. *Water Research*, 32:609-612.
- Beaton, J. D. (1966). Sulfur requirements of cereals, tree fruits, vegetables, and other crops. *Soil Science*, 101:267-282.
- Ben A., M, Elaoud, A., Salah, N. B. & Elmoueddeb, K. (2017). Effect of magnetic treatment on surface tension and water evaporation. *International Journal of Advance Industrial Engineering*, 5:119-124.
- Benton J., J. (2005). *Hydroponics: a practical guide for the soilless grower*. USA. CRC Press. 423 pp.
- Bernal A, A. (2010). *Arándano: Perfil Comercial*. Colima, México. Fundación PRODUCE. 54 pp.
- Birkhold, K.T. & Darnell, R.L. (1993). Contribution of storage and currently assimilated nitrogen to vegetative and reproductive growth of rabbiteye blueberry fruit. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 118:101-108.
- Bohn, H. R., McNeal, B. L. & O'connor, G. A. (2001). *Soil chemistry*. 3rd ed. USA. John Wiley & Sons, Inc. 307 pp.
- Bolaños A., Ma. N. (2018). *Relaciones nitrato/amonio y conductividad eléctrica en el crecimiento y dinámica nutrimental de arándano azul cv. Biloxi*. [Tesis de maestría. Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México. 119 pp.]
- Cai, R., Yang, H., He, J. & Zhu, W. (2009). The effects of magnetic fields on water molecular hydrogen bonds. *Journal of Molecular Structure*, 938:15-19.
- Campos, P. (2012). Arándanos: análisis temporada 2012-2013 y perspectivas futuras. *Revista Frutícola*, 3:4-7.
- Cefalas, A. C., Kobe, S., Dražic, G., Sarantopoulou, E., Kollia, Z., Stražišar, J. & Meden, A. (2008). Nanocrystallization of CaCO_3 at solid/liquid interfaces in magnetic field: A quantum approach. *Applied Surface Science*, 254:6715-6724.
- Cefalas, A. C., Sarantopoulou, E., Kollia, Z., Riziotis, C., Dražic, G., Kobe, S., Stražišar, J. & Meden, A. (2010). Magnetic field trapping in coherent antisymmetric states of liquid water molecular rotors. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 7:1800-1805.

- Chang, K. T. & Weng, C. I. (2006). The effect of an external magnetic field on the structure of liquid water using molecular dynamics simulation. *Journal of Applied Physics*, 100:043917.
- Chang, M. C. & Tai, C. Y. (2010). Effect of the magnetic field on the growth rate of aragonite and the precipitation of CaCO_3 . *Chemical Engineering Journal*, 164:1-9.
- Chang, R. (2008). *Fisicoquímica*. 3ra ed. México. McGraw-Hill Interamericana. 1018 pp.
- Chibowski, E. & Szcześ, A. (2018). Magnetic water treatment - a review of the latest approaches. *Chemosphere*, 203:54-67.
- Chibowski, E., Hołysz, L., Szcześ, A., & Chibowski, M. (2003a). Precipitation of calcium carbonate from magnetically treated sodium carbonate solution. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 225:63-73.
- Chibowski, E., Hołysz, L. & Szcześ, A. (2003b). Adhesion of in situ precipitated calcium carbonate in the presence and absence of magnetic field in quiescent conditions on different solid surfaces. *Water Research*, 37:4685-4692.
- Chibowski, E., Hołysz, L. & Szcześ, A. (2003c). Time dependent changes in zeta potential of freshly precipitated calcium carbonate. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 222:41-54.
- Chibowski, E., Hołysz, L., Szcześ, A., & Chibowski, M. (2004). Some magnetic field effects on in situ precipitated calcium carbonate. *Water Science and Technology*. 49:169-176.
- Coey J., M. D. (2012). Magnetic water treatment - how might it work?. *Philosophical Magazine*, 92:3857-3865.
- Colic, M. & Morse, D. (1999). The elusive mechanism of the magnetic “memory” of water. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 154:167-174.
- Crabtree M., Eslinger D., Fletcher P., Miller M., Johnson A. y King G. (1999). La lucha contra las incrustaciones - Remoción y prevención. *Oilfield Review*, 19 pp.
- Darnell, R. L. (1991). Photoperiod, carbon partitioning, and reproductive development in rabbiteye blueberry. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 116:856-860.

- Darnell, R. L. (2006). *Blueberry botany/environmental physiology* (pp. 5-13). In: Childers, N.F and Lyrene, P. M. (eds.), *Blueberries for growers, gardeners and promoters*. USA. Childers Publications.
- De Ell, J. (2002). Postharvest handling and storage of berries. *Berry notes*. 14(10):1-9.
- Eck, P., Gough, R. E., Hall, I. V. & Spiers, J. M. (1990) *Blueberry management* (pp. 273-333). In: Galletta, G. J. and Himelrick, D. G. (eds.), *Small fruit crop management*. USA. Prentice Hall.
- El Sayed, H. & El Sayed, A. (2014). Impact of magnetic water irrigation for improve the growth, chemical composition and yield production of broad bean (*Vicia faba* L.) plant. *Nature and Science*, 13:107-119.
- Escalera, V. J. C. (2009). *Propagación vegetativa de blueberry (Vaccinium corymbosum L.)*. [Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Hidalgo. 34 pp].
- Fathi, A., Mohamed, T., Claude, G., Maurin, G., & Mohamed, B. A. (2006). Effect of a magnetic water treatment on homogeneous and heterogeneous precipitation of calcium carbonate. *Water Research*, 40:1941-1950.
- Favela C., E., Preciado R., P. & Benavides M., A. (2006). *Manual para la preparación de soluciones nutritivas*. México. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. 146 pp.
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura, FIRA. (2016). *Panorama agroalimentario: Berries 2016*. México. Dirección de Investigación y Evaluación Económica Sectorial, FIRA. 41 pp.
- Forney, C. F., Mattheis, J. P. & Baldwin, A. E. (2009). *Effects on flavor* (pp. 119-158). In: Yahia, E. M., *Modified and controlled atmospheres for the storage, transportation, and packaging of horticultural commodities*. USA. CRC Press.
- Franceschi, V. R. & Nakata, P. A. (2005) Calcium oxalate in plants: formation and function. *Annual Review of Plant Biology*, 56:41-71.
- Fuqua, B., Byers, P., Kaps, M., Kovacs, L. & Waldstein, D. (2005) *Growing blueberries in Missouri*. USA. Missouri State University. Bulletin 44. 47 pp.
- Ganie, M. A., Akhter, F., Bhat, M. A., Malik, A. R., Junaid, J. M., Shah, M. A., Bhat, A. H. & Bhat T. A. (2013) Boron - a critical nutrient element for plant growth and productivity with reference to temperate fruits. *Current Science*, 104:76-85.

- García R., J. C. & García G. De L., G. (2005). *Guía de cultivo: orientaciones para el cultivo del arándano*. España. Servicio de Investigación y Desarrollo Agroalimentario. 32 pp.
- Gebauer, D., Völkel, A. & Cölfen, H. (2008). Stable Prenucleation Calcium Carbonate Clusters. *Science*, 322:1819-1822.
- Gerendás, J. & Führes, H. (2013). The significance of magnesium for crop quality. *Plant and Soil*, 368:101-128.
- Gough, R. E. (1994). *The highbush blueberry and its management*. USA. CRC Press. 272 pp.
- Grewal, H. S. & Maheswari, B. L. (2009). Magnetic treatment of irrigation water: Its effects on vegetable crop yield and water productivity. *Agricultural Water Management*, 96:1229-1236.
- Grewal, H. S. & Maheshwari, B. L. (2011). Magnetic treatment of irrigation water and snow pea and chickpea seeds enhances early growth and nutrient contents of seedlings. *Bioelectromagnetics*, 32:58-65.
- Guo, B., Han, H. & Chai F. (2011). Influence of magnetic field on microstructural and dynamic properties of sodium, magnesium and calcium ions. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21:494-498.
- Hachicha, M., Kahlaoui, B., Khamassi N., Misle E. & Jouzdan, O. (2018). Effect of electromagnetic treatment of saline water on soil and crops. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17:154-162.
- Hancock, J. F., Lyrene, P., Finn, C. E., Vorsa, N. & Lobos, G. A. (2008). *Blueberries and Cranberries* (pp. 115-150). In: Hancock, J. F (ed.), *Temperature fruit crop breeding*. USA. Springer.
- Hanson, E. J., Beggs, J. L. & Beaudry, R. M. (1993) Applying calcium chloride postharvest to improve highbush blueberry firmness. *HortScience*, 28:1033-1034.
- Hanson, E. J. & Hancock, J. F. (1996). *Managing the nutrition of highbush blueberries*. USA. Michigan State University Extension. Bulletin E-2011. 6 pp.
- Hanson, E. J. (2006). Nitrogen fertilization of highbush blueberry. *Acta Horticulturae*, 715:347-352.
- Haq, Z., Iqbal, M., Jamil, Y., Anwar, H., Younis, A., Arif, M., M. Zeshan, F. & Hussain F. (2016). Magnetically treated water irrigation effect on turnip seed germination,

- seedling growth and enzymatic activities. *Information Processing In Agriculture*, 3:99-106.
- Hart, J., Strik, B., White, L. & Yang, W. (2006). *Nutrient management for blueberries in Oregon*. USA. Oregon State University Extension Service. Publication Num. EM 8918. 14 pp.
- Haynes, W. M., Lide, D. R. & Bruno, T. J. (2017). *Magnetic susceptibility of the elements and inorganic compounds (section 4, pp. 126-131)*. In; Haynes, W. M. (ed), CRC Handbook of Chemistry and Physics. 97th ed. USA. CRC Press.
- Hewitt, E. J. (1996). *Sand and water culture methods used in the study of plant nutrition*. Technical communication No. 22. England. Commonwealth Bureau of Horticulture and Plantation Crops.
- Higashitani, K., Kage, A., Katamura, S., Imai, K. & Hatade, S. (1993). Effects of a magnetic field on the formation of CaCO_3 particles. *Journal of Colloid and Interface Science*, 156:90-95.
- Hirschi, K. D. (2004). The calcium conundrum. Both versatile nutrient and specific signal. *Plant Physiology*, 136:2438-2442.
- Hirzel, C. J. (2010). *Acumulación de nutrientes en frutos de arándano*. Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Consultado el 10 de marzo del 2020. <https://www.redagricola.com/cl/acumulacion-nutrientes-frutos-arandano/>.
- Hocking, B., Tyerman, S. D., Burton, R. A. & Gilliam, M. (2016) Fruit calcium: transport and physiology. *Frontiers in Plant Science*, 7:569.
- Holysz, L., Chibowski, E. & Szcześ, A. (2003). Influence of impurity ions and magnetic field on the properties of freshly precipitated calcium carbonate. *Water Research*, 37:3351-3360.
- Holysz, L., Szczes, A. & Chibowski, E. (2007). Effects of a static magnetic field on water and electrolyte solutions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 316:996-1002.
- Jackson, D. I. & Looney, N. E. (2002). *Producción de frutales de clima templado y subtropical*. México. Acribia. 662 pp.
- Jiménez, M., Carpenter, F., Molinar, R. H., Wright, K. & Day, K. R. (2005). Blueberry research launches exciting new California specialty crop. *California Agriculture*, 59:65-69.

- Katyal, J. C. & Sharma, B. D. (1981). All India coordinated scheme on micronutrients in soils and plants. 15th annual report, 1981-1982. India. Indian Council of Agricultural Research, ICAR.
- Kney, A. D. & Parsons, S. A. (2006). A spectrophotometer-based study of magnetic water treatment: assessment of ionic vs. surface mechanisms. *Water Research*, 40:517-524.
- Knez, S. & Pohar, C. (2005). The magnetic field influence on the polymorph composition of CaCO₃ precipitated from carbonized aqueous solutions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 281:377-388.
- Kobe, S., Dražić, G., McGuinness, P. J., Meden, T., Sarantopoulou, E., Kollia, Z. & Cefalas, A. C. 2003. Control over nanocrystalization in turbulent flow in the presence of magnetic fields. *Materials Science and Engineering C*, 23:811-815.
- Korcak, R. F. (1988) *Nutrition of blueberry and other calcifuges* (pp. 183-227). In: Janick J. (ed.), Horticultural Reviews Vol. 10. USA. Timber Press.
- Koshoridze, S.I. & Levin, Y. K. (2014). The influence of a magnetic field on the coagulation of nanosized colloid particles. *Technical Physics Letters*, 40:716-719.
- Krewer, G. and NeSmith, D. S. (1999). *Blueberry fertilization in soil*. USA. University of Georgia Ext. Fruit Publication 01-1. 12 pp.
- Lang, G. A. (1993). Southern highbush blueberries: physiological and cultural factors important for optimal cropping of these complex hybrids. *Acta Horticulturae*, 46:72-80.
- Lungader M., H. E. (1995). Influence of magnetic field on the precipitation of some inorganic salts. *Journal Crystal Growth*, 152:94-100.
- Lundager M., H. E. (2004). Crystallization of calcium carbonate in magnetic field in ordinary and heavy water. *Journal Crystal Growth*, 267:251-255.
- Marschner, P. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. 3rd edition. USA. Elsevier, Academic Press. 651 pp.
- Martínez C., L. (1996). *Detección de insectos plaga en blueberry (Vaccinium ashei Reade), en Zacatlán, Puebla, México*. [Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México. 86 pp].

- Maust, B. E., Williamson, J. G. & Darnell, R. L. (1999). Flower bud density affects vegetative and fruit development in field-grown southern highbush blueberry. *Horticultural Science*, 34:607-610.
- Mengel, K. & Kirkby, E. (2000). *Principios de nutrición vegetal* (Ricardo J. Melgar, ed. y trad.). Alemania. 1ra edición. Instituto Internacional del Potasio. 608 pp.
- Moggia, C. (1991). *Aspectos de cosecha y postcosecha de arándanos* (pp. 80-92). En: Retamales, J., Moggia, C., Lolas, M. y Román, H. (eds.), Seminario Internacional: Arándano - producción comercial y perspectivas económicas. Chile. Universidad de Talca.
- Morejón, L. P., Castro P., J. C., Velázquez A., L. & Govea, A. P. (2007). Stimulation of *Pinus tropicalis* M. seeds by magnetically treated water. *International Agrophysics*, 21:173-177
- Mosin, O. & Ignatov, I. (2014). Basic concepts of magnetic water treatment. *Nanotechnology Research and Practice*. 4:187-200.
- Mostafazadeh F., B., Khoshravesh, M., Mousavi, S. F. & Kiani, A. R. (2011). Effects of magnetized water and irrigation water salinity on soil moisture distribution in trickle irrigation. Technical Note. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 137:398-402.
- Moussa, H. R. (2011). The impact of magnetic water application for improving common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) production. *New York Science Journal*, 4(6).
- Nakagawa, J., Hirota, N., Kitazawa, K. & Shoda, M. (1999). Magnetic field enhancement of water vaporization. *Journal of Applied Physics*, 86:2923-2925.
- Nesmith D. S., Prussia, S. E., Tetteh, M. & Krewer, G. (2002). Firmness losses of rabbiteye blueberries (*Vaccinium ashei* Reade) during harvesting and handling. *Acta Horticulturae*, 574:287-293.
- Nesom, G. (2002). *Highbush Blueberry Vaccinium corymbosum* L. USDA NRCS National Plant Data Center and the Biota of North America Program. USA. United States Department Agriculture. 2 pp.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO. (2019). *Estadísticas, FAOSTAT*. Disponible en <http://www.fao.org/faostat/es/#data>
- Otsuka, I. & Ozeki, S. (2006). Does magnetic treatment of water change its properties?. *The Journal of Physical Chemistry B*, 110:1509-1512.

- Pang, X. F. & Deng, B. (2008). The changes of macroscopic features and microscopic structures of water under influence of magnetic field. *Physica B: Condensed Matter*, 403:3571-3577.
- Pang, X. F. (2014a). *Chapter 1: Molecular structures of water and its features (1-88)*. In: Pang, X. F. (ed.), Water molecular structure and properties. Singapur. World Scientific.
- Pang, X. F. (2014b). The experimental evidences of the magnetism of water by magnetic-field treatment. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 24:1-6.
- Pineda P. J., Avitia G. E., Castillo G. A. M., Corona T. T., Valdez A. L. A. & Gómez H. J. (2008). Extracción de macronutrientes en frambueso rojo. *Terra Latinoamerica*, 26:333-340.
- Pino P., C. M. (2007). *Descripción del desarrollo vegetativo y de las características físicas y químicas de los frutos de cuatro clones de arándano alto (Vaccinium corymbosum L.)*. [Tesis de Licenciatura. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. 74 pp.]
- Piyadasa, C., Yeager, T. R., Gray, S. R., Stewart, M. B., Ridgway, H. F., Pelekani, C. & Orbell, J. D. (2017). The influence of electromagnetic fields from two commercially available water-treatment devices on calcium carbonate precipitation. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 3:566-572.
- Porter, A. F. (1865). Preventing incrustation of steam boilers. *U.S. Patent*, 50:774.
- Pouget, E. M., Bomans, P. H. H., Goos, J. A. C. M., Frederik, P. M., de With, G. & Sommerdijk, N. A. J. M. (2009). The initial stages of template-controlled CaCO₃ formation revealed by Cryo-TEM. *Science*, 323:1455-1458.
- Ratnaparkhe, M. B. (2007). *Blueberry (pp. 217-227)*. In: Kole C. (ed.), Fruits and nuts. Genome mapping and molecular breeding in plants. Vol. 4. USA. Springer.
- Rebolledo K., C. (2013). *Poda y polinización en arándano (23-30)*. En: Undurraga, P y Vargas, S. (eds.), Manual del arándano. Boletín INIA, No. 263. Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Retamales, J. B. & Hancock, J. F. (2012). *Blueberries*. 1st Edition. Crop production science in horticulture series. USA. CABI. 323 pp.

- Retamales, J. B. & Hancock, J. F. (2018). *Blueberries*. 2nd Edition. Crop production science in horticulture series. USA. CABI. 411 pp.
- Rex, A. F. & Wolfson, R. (2011). *Fundamentos de física*. 1ra ed. México. Pearson Educación. 770 pp.
- Rojas L., Y., Alberdi, M., Acevedo, P., Inostroza B., C., Rengel, Z., Mora, M. & Reyes D., M. (2014) Manganese toxicity and UV-B radiation differentially influence the physiology and biochemistry of highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum*) cultivars. *Functional Plant Biology*, 41:156-167.
- Saksono, N., Gozan, M., Bismo, S., Krisanti, E., Widaningrum, R. & Song, S. K. (2008). Effects of magnetic field on calcium carbonate precipitation: Ionic and particle mechanisms. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 25:1145-1150.
- Sapers G., M., Burgher A., M., Phillips J., G., Jones S., B. & Stone E., G. (1984). Color and composition of highbush blueberry cultivars. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 109:105-111.
- Sarkar, A. & Mahapatra, S. (2010). Synthesis of all crystalline phases of anhydrous calcium carbonate. *Crystal Growth and Design*, 10(5), 2129-2135.
- Selim, A-F. H. & El-Nady, M. F. (2011). Physio-anatomical responses of drought stressed tomato plants to magnetic field. *Acta Astronautica*, 69:387-396.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SIAP. (2018). *Atlas agroalimentario 2012-2018 (pp. 34-35)*. México. SAGARPA.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SIAP. (2019). *Panorama agroalimentario 2019 (pp. 32-33)*. México. SAGARPA.
- Serway, R. A. & Jewett Jr., J. W. (2009). *Física para ciencias e ingeniería con física moderna*. Vol. 2. 7ma ed. México. Cengage Learning. 641-1392 pp.
- Seyfi, A., Afzalzadeh, R. & Hajnorouzi, A. (2017). Increase in water evaporation rate with increase in static magnetic field perpendicular to water-air interface. *Chemical Engineering and Processing*, 120:195-200.
- Shen, R. F., Chen, R. F. & Ma, J. F. (2006). Buckwheat accumulates aluminum in leaves but not in seeds. *Plant and Soil*. 284:265–271.
- Shoemaker, J. S. (1975). *Blueberries (pp. 249-285)*. In: Shoemaker, J. S. (ed.), Small fruit culture. USA. The Avi Publishing Company.

- Silva, I. B., Queiroz N., J. C. & Petri D., F. S. (2015). The effect of magnetic field on ion hydration and sulfate scale formation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 465:175-183.
- Sohaili, J., Shi, H. S., Lavania-Baloo, Zardari, N. H., Ahmad, N. & Muniyandi, S. K. (2016). Removal of scale deposition on pipe walls by using magnetic field treatment and the effects of magnetic strength. *Journal of Cleaner Production*, 139:1393-1399.
- Sonneveld, C. & Voogt, W. (2009). *Plant nutrition of greenhouse crops*. USA. Springer. 431 pp.
- Spiers, J. M., Stringer, S. J., Draper, A. D., & Gupton, C. L. (2002). 'Biloxi' southern highbush blueberry. *Acta Horticulturae*, 574:153-155.
- Steiner, A. A. (1961). A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil*, 15:34-154.
- Steiner, A. A. (1968). *Soilless culture* (pp. 324-341). In: Proceedings of the IPI 1968. Italy. 6th Colloquium of the International Potash Institute.
- Steiner, A. A. (1980). The selective capacity of plants for ions and its importance for the composition and treatment of the nutrient solution. *Acta Horticulturae*, 98:87-97.
- Steiner, A. A. (1984). *The universal nutrient solution* (pp. 633-650). Proceedings of IWOSC 1984. The Netherlands. 6th International Congress on Soilless Culture.
- Sten-Knudson, O. (2007). *Biological membranes: theory of transport, potentials and electrical impulses*. USA. Cambridge University Press. 696 pp.
- Stiles, W. C. and Reid, W. S. (1991). Orchard nutrition management. USA. Cornell Cooperative Extension. Information Bulletin Num. 219. 24 pp.
- Surendran, U., Sandeep, O. & E. J., J. (2016). The impacts of magnetic treatment of irrigation water on plant, water and soil characteristics. *Agricultural Water Management*, 178:21-29.
- Szczęś, A., Chibowski, E., Hołysz, L. & Rafalski, P. (2011). Effects of static magnetic field on water at kinetic condition. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 50:124-127.
- Tan, K. H. (2011). *Principles of soil chemistry*. 4th ed. USA. CRC Press. 362 pp.
- Throop, P. A. & Hanson, E. J. (1998). Nitrification and utilization of fertilizer nitrogen by highbush blueberry. *Journal of Plant Nutrition*, 21:1731-1742.

- Tippens, P. E. (2011). *Física, conceptos y aplicaciones*. 7ma ed. México. McGraw-Hill Interamericana. 782 pp.
- Toledo E., J. L., Ramalho, T. C. & Magriotis, Z. M. (2008). Influence of magnetic field on physical-chemical properties of the liquid water: Insights from experimental and theoretical models. *Journal of Molecular Structure*, 888:409-415.
- Trehane, J. (2004). *Blueberries, cranberries and others vacciniums*. USA. Timber Press. 256 pp.
- Trejo T., L. I. & Gómez M., F. C. (2012) *Nutrient solutions for hydroponic systems (pp. 1-22)*. In: Asao, T. (ed.), *Hydroponics - A standard methodology for plant biological researches*. Croatia. InTech.
- Ueno, S. & Iwasaka, M. (1994a). Parting of water by magnetic fields. *IEEE Transactions on Magnetics*, 30:4698-4700.
- Ueno, S. & Iwasaka, M. (1994b). Properties of diamagnetic fluid in high gradient magnetic fields. *Journal of Applied Physics*, 75:7177-7179.
- Urrestarazu G., M. (2004). *Tratado de cultivo sin suelo*. 3ra ed. España. Mundi-Prensa. 914 pp.
- Valenzuela, B. J. (1988). Requerimientos agroclimáticos de las especies de arándanos. En W. Lobos A. (ed.). *Seminario: El cultivo del arándano*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Chile. *Serie Carillanca*, 2:203.
- Vermeiren, T. (1953). Magnetic treatment device for liquids. *US Patent*, 2652925.
- Vidal, I., Amaro J. & Venegas A. (1999). Evolución estacional de nutrientes y estimación de la extracción anual en arándano ojo de conejo (*Vaccinium ashei* R.). *Agricultura Técnica (Chile)*, 59:309-318.
- Wang, S. S. S., Chang, M. C., Chang, H. C., Chang, M. H. & Tai, C. Y. (2012). Growth behavior of aragonite under the influence of magnetic field, temperature, and impurity. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 51:1041-1049.
- Wang, Y., Wei, H. & Li, Z. (2018). Effect of magnetic field on the physical properties of water. *Results in Physics*, 8:262-267.
- Williamson, J. G., Phillips, D. A., Lyrene, P. M. & Munoz, P. R. (2014). *Southern highbush blueberry cultivars from the University of Florida*. USA. The Institute of Food and Agricultural Sciences. 13 pp.

- Xiao F. Pang & Bo, D. (2008). The changes of macroscopic features and microscopic structures of water under influence of magnetic field. *Physica B*, 403:3571-3577.
- Young, H. D. & Freedman, R. A. (2009). *Física universitaria con física moderna*. Vol. 2. 12ma ed. México. Pearson Educación. 896 pp.
- Zaidi, N. S., Sohaili, J., Muda, K. & Sillanpää, M. (2014). Magnetic field application and its potential in water and wastewater treatment systems. *Separation and Purification Reviews*, 43:206-240.
- Zhao, X. Q., Chen, R. F. & Shen, R. F. (2014). Coadaptation of plants to multiple stresses in acidic soils. Technical note. *Soil Science*, 179:503-513.

**CAPITULO II. ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE LA SOLUCIÓN DE
LA RIZÓSFERA EN ARÁNDANO AZUL CV. BILOXI
DESARROLLADO EN DISTINTAS RELACIONES Ca/Mg/K Y
SOLUCIÓN NUTRITIVA MAGNETIZADA**

ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE LA SOLUCIÓN DE LA RIZÓSFERA EN ARÁNDANO AZUL CV. BILOXI DESARROLLADO EN DISTINTAS RELACIONES Ca/Mg/K Y SOLUCIÓN NUTRITIVA MAGNETIZADA

Resumen

Con la finalidad de generar más información acerca de las características fisiológicas y nutrimentales del arándano, se evaluaron los efectos de seis soluciones nutritivas (SN's), con distintas relaciones Ca/Mg/K, sobre el balance catiónico relativo Ca/Mg/K/NH₄/Na/Al/Fe/Mn, relaciones porcentuales NO₃/NH₄ y NO₃/H₂PO₄, pH y conductividad eléctrica (CE) de soluciones de la rizósfera extraídas en plantas de arándano azul cv. Biloxi. Además, el trabajo incluyó un estudio sobre la influencia de la aplicación de campos magnéticos (CM's) a las SN's, técnica que ha dado resultados favorables en algunos cultivos. Los resultados demostraron estadísticamente que las plantas de arándano realizaron un ajuste al balance catiónico relativo de la rizósfera independientemente de los balances establecidos en las soluciones nutritivas. Este ajuste fue similar en todas las SN's, pero el grado de variación de cada catión con respecto a su propio balance fue diferente, siendo el Ca y Na los elementos que presentaron las diferencias significativas más altas. La CE y las relaciones NO₃/NH₄, NO₃/H₂PO₄, tuvieron efectos similares en la mayoría de las SN's. En la solución nutritiva con el nivel más alto de calcio, la CE y la relación NO₃/H₂PO₄ fueron estadísticamente diferentes con respecto a las demás soluciones. No se encontraron diferencias significativas para el pH. Por otro parte, se produjeron efectos significativos de energización y magnetización en los cationes al aplicar CM's en las soluciones nutritivas. Finalmente, utilizando los fundamentos del método universal de Steiner para diseñar soluciones nutritivas y los principios fisicoquímicos de las soluciones electrolíticas, se realizó un análisis termodinámico de la información, utilizando como base, los datos de los cationes determinados en la rizósfera. Bajo este planteamiento teórico, fue posible realizar interpretaciones adicionales de los datos del experimento como el orden de equilibrio catiónico relativo de la raíz el cual fue 36.2, 26.7, 20.0, 10.1, 5.4, 1.4, 0.2 y 0.03% para NH₄, K, Ca, Mg, Na, Al, Fe y Mn.

Palabras clave: arándano, soluciones nutritivas, campos magnéticos, análisis termodinámico.

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF RIZOSPHERE SOLUTION IN BLUEBERRY CV. BILOXI DEVELOPED ON DIFFERENT Ca/Mg/K RATIO AND MAGNETIZED NUTRIENT SOLUTION

Abstract

For the purpose to generate more information about physiological and nutritional blueberry characteristics, effects of six nutrient solutions (NS's) with different Ca/Mg/K ratios were evaluated on relative cation balance Ca/Mg/K/NH₄/Na/Al/Fe/Mn, NO₃/NH₄ and NO₃/H₂PO₄ ratios, pH and electrical conductivity (EC) in rhizosphere solutions which were extracted in blueberry plants cv. Biloxi. In addition, the work included a study on the influence of the application of magnetic fields (MF's) to NS's, a technique that has yielded favorable results in some crops. The results showed statistically that blueberry plants generate an adjustment on relative cationic balance in rhizosphere solution independently of nutrient solutions balances. This adjustment was similar across all NS's, but the degree of variation of each cation with respect to its own balance was different, with Ca and Na being the elements that presented the highest significant differences. EC and NO₃/NH₄, NO₃/H₂PO₄ ratios had similar effects in most of the NS's. The highest calcium level in nutrient solution, EC and NO₃/H₂PO₄ ratio were statistically different compared to other solutions. Not significant differences were found on pH. Magnetic fields produced energization and magnetization effects on cations in nutrient solutions. Finally, using the foundations of Steiner's universal method to design nutrient solutions and the physicochemical principles of electrolyte solutions, a thermodynamic analysis of the information was performed, using as a basis the data of the cations determined in the rhizosphere. On this theoretical approach, it was possible to make additional interpretations about experiment data such as the relative cationic equilibrium order in root which was 36.2, 26.7, 20.0, 10.1, 5.4, 1.4, 0.2 and 0.03% for NH₄, K, Ca, Mg, Na, Al, Fe and Mn, respectively.

Keywords: blueberry, nutrient solutions, magnetic fields, thermodynamic analysis

2.1. Introducción

El arándano azul es originario del noreste de Estados Unidos (Jiménez *et al.*, 2005) y pertenece al género *Vaccinium* el cual incluye alrededor de 450 especies que están distribuidas en el mundo (Trehane, 2004). Tres especies son de gran importancia económica: el arándano tipo “arbustos altos”, *Vaccinium corymbosum* L., el arándano tipo “arbustos bajos” *Vaccinium angustifolium* L. y el arándano ojo de conejo, *V. ashei* L. La mayor parte de la producción mundial de arándanos proviene del arándano de arbustos altos (Ratnaparkhe, 2007).

El arándano, en su contexto internacional, es la frutilla que más dinamismo ha mostrado en su comercio. Entre 2003 y 2012, el volumen de las exportaciones mundiales de arándanos presentó una tasa de crecimiento promedio anual de 10%, siendo los principales países exportadores de arándanos en ese periodo Estados Unidos, Canadá y Polonia (FIRA, 2016). De acuerdo a los datos de la FAO (2019), a partir del año 2014 México se posiciona como exportador importante de esta frutilla, siendo Jalisco, Michoacán y Sinaloa los estados que encabezan el cultivo del arándano, en superficie sembrada y en valor económico (SIAP, 2019).

A nivel mundial, Estados Unidos de América es el país líder en la producción de arándano. En 2019, el volumen producido por este país fue de aproximadamente 255,050 t, seguido por Canadá con una producción de 164,205 t. En ese mismo año, México figuró como 5° productor mundial de esta frutilla con un aporte de 40,251 t (FAO, 2019). El destino comercial del volumen nacional obtenido, es principalmente Estados Unidos, el cual adquiere 95.4% de la frutilla (SIAP, 2018).

Los arándanos se consideran plantas calcífugas, debido a que crecen y se desarrollan de manera óptima en suelos ácidos en los que el contenido de calcio es bajo. Esto les confiere diferencias fisiológicas y nutrimentales con respecto a la mayoría de las especies cultivables, las cuales, escasamente han sido sujetas a estudios (Korcak, 1988).

El manejo nutrimental del arándano es un factor de mucha importancia en la productividad y calidad de la fruta producida (Hirzel, 2010). La demanda de nutrimentos

de los arándanos es baja en comparación con los árboles frutales (Austin y Gaines, 1984) debido a que los arándanos están adaptados a condiciones ácidas del suelo (Korcak, 1988). El mejor crecimiento y productividad se obtienen cuando crecen a un pH del suelo entre 4.2 a 5.5. A este pH, la disponibilidad de la mayoría de los nutrimentos del suelo es limitada y esto reduce la cantidad de elementos minerales que absorbe la planta (Retamales y Hancock, 2018; Korcak, 1988). Son plantas eficientes en la absorción del calcio y por lo tanto necesitan bajos requerimientos de este nutrimento, debido a esto, los arándanos raramente presentan deficiencias. Los niveles foliares de Ca van de 0.3 a 0.8% (Hanson y Hancock, 1996). Son plantas tolerantes a altas concentraciones de algunos metales, especialmente Al y Mn, absorben eficientemente el Fe y prefieren el NH_4 como forma predominante de nitrógeno en el suelo (Korcak, 1988).

Debido a que el conocimiento de aspectos fisiológicos y nutricionales en los cultivos son la base fundamental para el establecimiento de cualquier programa de fertilización, ya que este debe ser ajustado para cada especie vegetal en suficiencia y balance (Pineda *et al.*, 2008), este trabajo consistió en estudiar uno de los balances críticos más importantes en la nutrición de plantas calcífugas, la relación Ca/Mg/K (Steiner, 1980). Se evaluó el efecto de seis soluciones nutritivas (SN's), con distintas relaciones Ca/Mg/K, sobre el equilibrio iónico de la solución de la rizósfera en plantas de arándano azul cv. Biloxi. También se estudiaron los efectos producidos por el uso de campos magnéticos (CM's) en las SN's, ya que en diversos trabajos se han reportado efectos benéficos del uso de agua tratada magnéticamente en los cultivos bajo una serie de condiciones agrícolas. De acuerdo a los resultados de varios estudios, el tratamiento magnético del agua tiene la capacidad de estimular procesos bioquímicos y fisiológicos en varias especies vegetales que se reflejan en aumentos en la biomasa fresca y seca, concentraciones nutrimentales y de algunos metabolitos, actividad enzimática, actividad fotosintética, rendimiento, entre otros (Hachicha *et al.*, 2018; Surendran *et al.*, 2016; Haq *et al.*, 2016; El Sayed y El Sayed, 2014; Grewal y Maheshwari, 2011). Asimismo, se realizó un análisis termodinámico a la información de los cationes evaluados en la rizósfera, utilizando los fundamentos del método universal de Steiner para el diseño de SN's y los principios fisicoquímicos de las soluciones electrolíticas (Tan, 2011; Chang, 2008).

2.2. Materiales y métodos

2.2.1. Localización

El experimento se desarrolló de noviembre 2018 a noviembre 2019 en un invernadero tipo túnel ubicado en las coordenadas 19° 29' 22.0" latitud N y 98° 52' 20.5" longitud W, dentro de las instalaciones del Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo.

2.2.2. Material vegetal y sustrato

Las unidades experimentales estuvieron compuestas por una planta de arándano cv. Biloxi de cuatro años de edad trasplantado en un contenedor de plástico de 30 L con una mezcla compuesta de perlita, turba y fibra de coco como sustrato en proporción 1:1:1.

2.2.3. Tratamientos y diseño experimental

Utilizando los fundamentos del método universal de Steiner (1984) se prepararon soluciones nutritivas como fuente de nutrimentos, a pH de 4.9-5.1, conductividad eléctrica de 1.65-1.75 dS·m⁻¹ y una relación NO₃/NH₄ de 30/70. Con estas características se propusieron seis relaciones Ca/Mg/K y dos niveles de magnetización (0 y 350 mT), formando un diseño de tratamientos bifactorial (2x6), resultando 12 tratamientos. Cada tratamiento tuvo 5 repeticiones y se dispusieron en un diseño experimental de parcelas divididas.

Las relaciones Ca/Mg/K de las soluciones empleadas se establecieron variando el nivel de Ca y ajustándolo proporcionalmente a los niveles de Mg y K, de tal manera, que la relación Mg/K permaneciera constante (0.57). Las relaciones Ca/Mg/K empleadas fueron: 40.0/21.8/38.2 (SN1), 35.0/23.6/41.4 (SN2), 30.0/25.4/44.6 (SN3), 25.0/27.2/47.8 (SN4), 20.0/29.0/51.0 (SN5) y 15.0/30.8/54.2 (SN6).

Para la magnetización de las soluciones nutritivas se utilizaron imanes comerciales de ferrita, de forma rectangular. Las dimensiones de los imanes fueron de 83x55x8 mm con una intensidad magnética de 350 mT (especificación técnica del fabricante; Abastecedora Universal de Magnéticos, UNIMAN). El dispositivo magnético utilizado para tratar la solución nutritiva consistió de ocho imanes dispuestos en dos placas

longitudinales conectadas N-S, separadas a una distancia de 2.0 a 2.5 cm aproximadamente. Con base en el tiempo de influencia del campo magnético con las SN's durante el flujo (7.5 - 8.5 s) y utilizando la fórmula de dosis de exposición absoluta propuesta por Pietruszewski y Kania (2010), se estimó una densidad de energía absoluta de interacción de $365.6 - 414.3 \text{ KJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$.

2.2.4. Variables evaluadas

Las variables respuesta, balance catiónico Ca/Mg/K/NH₄/Na/Al/Fe/Mn, relaciones NO₃/NH₄ y NO₃/H₂PO₄, pH y CE, se evaluaron en la solución nutritiva de la rizósfera con el propósito de determinar el ajuste realizado por las plantas a su medio de crecimiento. Para ello, las muestras fueron extraídas de las macetas utilizando lisímetros de succión o chupatubos. Los lisímetros se colocaron de tal manera que las placas porosas estuvieran a una distancia entre 10-15 cm del tronco base y a una profundidad de aproximadamente de 2/3 la altura del contenedor donde se encontraba la mayor densidad radical. Las variables se midieron de la siguiente manera:

Potencial de hidrógeno (pH) y conductividad eléctrica (CE). Las determinaciones se realizaron utilizando un potenciómetro marca Hanna modelo HI991301.

Concentraciones químicas de N-NH₄, N-NO₃, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Na y Al, expresadas en meq·L⁻¹. Para su determinación se utilizaron las metodologías propuestas por la NOM-021-SEMARNAT-2000. El N se determinó por el método microkjeldahl de doble destilación. Se tomó una alícuota de 25 mL por cada muestra y se vació en un matraz kjeldahl, se adicionó aproximadamente 2 g de MgO calcinado. Luego se colocó un matraz Erlenmeyer al final del tubo del refrigerante, a la cual se le agregó previamente 10 mL de una solución de ácido bórico mezclado con dos indicadores (verde de bromocresol y rojo de metilo), y se realizó la primera destilación para cuantificar N-NH₄. Posteriormente, en la misma muestra se adicionó 0.4 g de aleación de Devarda, se colocó otro matraz Erlenmeyer con la mezcla de indicadores y se realizó una segunda destilación para determinar N-NO₃. Se realizaron las titulaciones correspondientes con H₂SO₄ 0.05 N. Para la determinación del P se usó el método colorimétrico del vanadato-molibdato, el cual consistió en tomar una alícuota de 5 mL por muestra para después transferirlos a matraces aforados de 50 mL. A cada matraz se le agregó 10 mL de ácido

nítrico 2 N y 5 mL de la mezcla vanadato-molibdato para el desarrollo de color; luego se aforaron a 50 mL. De la misma manera, se elaboró la curva patrón de P a las concentraciones de 0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0 y 12.5 mg·L⁻¹, respectivamente. Se dejaron reposar por aproximadamente una hora y se realizaron lecturas a 420 nm con un espectrofotómetro de luz ultravioleta marca Thermo Scientific modelo Genesys 10uv. El K y el Na se determinaron con un espectrofotómetro de emisión de flama (flamómetro marca Sherwood modelo 410) y los cationes Ca, Mg, Fe y Mn con un espectrofotómetro de absorción atómica (AAS marca GBC modelo Avanta). En algunos casos, fue necesario realizar diluciones con el propósito de que las lecturas obtenidas estuvieran dentro de los intervalos de cada curva patrón. Las concentraciones de las curvas utilizadas se expresaron en mg·L⁻¹. El Al fue determinado por el método de Barnhisel y Bertsch (1982). Se extrajeron 15 mL de alícuota por muestra y se transfirió a un matraz Erlenmeyer. Se agregaron cinco gotas de fenolftaleína al 0.5% y se tituló con hidróxido de sodio 0.1 M hasta un punto final de rosa permanente. Después, a la misma muestra se le adicionó 2 mL de fluoruro de potasio 1 N y se tituló con ácido clorhídrico 0.1 N hasta la desaparición del color rosa. Posteriormente se realizaron los cálculos correspondientes para expresar las concentraciones de todos los nutrimentos en meq·L⁻¹. Las fórmulas utilizadas fueron:

$$\text{meq L}^{-1} \text{ de NH}_4 \text{ y NO}_3 = \frac{(\text{mL H}_2\text{SO}_4 \text{ muestra} - \text{mL H}_2\text{SO}_4 \text{ blanco}) \times N_{\text{H}_2\text{SO}_4}}{\text{mL alícuota} / 1000}$$

$$\text{meq L}^{-1} \text{ de P, K, Ca, Mg, Fe, Mn y Na} = \frac{(\text{ppm}_{\text{muestra}} - \text{ppm}_{\text{blanco}}) \times F1_{\text{dilución}} \times F2_{\text{dilución}}}{P_{\text{equivalente}}}$$

$$\text{meq L}^{-1} \text{ de Al} = \frac{(\text{mL HCl}_{\text{muestra}} - \text{mL HCl}_{\text{blanco}}) \times N_{\text{HCl}}}{\text{mL alícuota} / 1000}$$

Tomando de referencia los trabajos de Steiner realizados en 1966 y 1980, los datos expresados en meq·L⁻¹ se transformaron a proporciones relativas. Las relaciones porcentuales que se analizaron fueron Ca/Mg/K/NH₄/Na/Al/Fe/Mn, NO₃/NH₄ y NO₃/H₂PO₄.

Posteriormente se efectuó un análisis termodinámico a los datos de los cationes analizados en la solución de la rizósfera utilizando los fundamentos del método universal de preparación de SN's (Steiner, 1984) y los principios fisicoquímicos de las soluciones electrolíticas (Tan, 2011). La finalidad fue dar una interpretación adicional a los efectos observados en las plantas de arándano considerando la actividad química como la variable más adecuada para el análisis de la información debido a su relación directa con los sistemas biológicos (Tan, 2011; Chang, 2008). A través de esta inferencia y haciendo los cálculos correspondientes, se obtuvieron tres variables adicionales que se sumaron al análisis estadístico, la actividad catiónica relativa $\text{Ca/Mg/K/NH}_4\text{/Na/Al/Fe/Mn}$, la energía libre catiónica y la susceptibilidad magnética catiónica (Haynes, 2017; Tan, 2011; Steiner, 1984).

2.2.5. Análisis de datos

Los datos obtenidos se procesaron estadísticamente utilizando el programa SAS 9.0. Se efectuó un análisis de varianza para todas las variables medidas. Asimismo, se realizó una comparación múltiple de medias, utilizando la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$), para el balance catiónico relativo $\text{Ca/Mg/K/NH}_4\text{/Na/Al/Fe/Mn}$, la actividad catiónica relativa $\text{Ca/Mg/K/NH}_4\text{/Na/Al/Fe/Mn}$, las relaciones $\text{NO}_3\text{/NH}_4$ y $\text{NO}_3\text{/H}_2\text{PO}_4$, el pH y la CE; también se realizó una comparación de grupos de tratamientos, usando el método de contrastes, para la energía libre catiónica y la susceptibilidad magnética catiónica.

2.3. Resultados y discusión

2.3.1. Balance catiónico y aniónico, pH y CE de la solución de la rizósfera

Los balances catiónicos de la solución de la rizósfera que se presentan en el Cuadro 2.3.1, producidos por las relaciones Ca/Mg/K de las SN's empleadas en las plantas de arándano, muestran una tendencia de ajuste a un balance promedio, no solo para los cationes que son nutrimentos, sino también para otros elementos como Al y Na. Congruente a los fundamentos de Steiner (1984, 1966, 1961), las plantas evaluadas modificaron cada solución nutritiva aplicada y la ajustaron a una condición de equilibrio. Independientemente de las relaciones catiónicas que se aplicaron con cada SN, la planta ajustó entre ciertos límites, el ambiente iónico de la raíz, de tal manera, que los procesos de intercambio de energía y materia entre la raíz y su medio pudieran efectuarse con mayor eficiencia (Chang, 2008; Steiner, 1980). Las diferencias

significativas que se observaron en los cationes (Cuadro 2.3.1), pueden ser explicadas por el desbalance que tiene cada solución nutritiva utilizada con respecto al balance promedio requerido por la condición nutrimental óptima de la planta.

En el Cuadro 2.3.2 se muestran las relaciones catiónicas Ca/Mg/K/NH₄ de las SN's y de la condición nutrimental óptima. Estos datos se graficaron para facilitar la interpretación (Figura 2.3.1). Se observa que el Ca y K fueron los nutrimentos con los niveles más cercanos al del balance nutrimental óptimo. Los niveles de Ca en las soluciones 3 y 4, fueron los menos desbalanceados con respecto al nivel óptimo del nutrimento, mientras que para el K esto ocurrió en las soluciones 2, 3 y 4. El NH₄ y el Mg, por el contrario, están altamente desbalanceados con respecto a sus niveles óptimos. Como se puede observar en la Figura 2.3.1, el amonio que se utilizó en las SN's fue excesivo, alrededor de 16.5% por arriba de su nivel óptimo. En cambio, para el magnesio, los niveles empleados en las soluciones estuvieron muy por debajo del nivel óptimo. Esto produjo síntomas típicos de deficiencia (Figura 2.3.2) que fueron observadas en las hojas basales de las plantas de arándano. La clorosis intervenal es el síntoma más característico de las deficiencias de Mg; las hojas se pueden volver amarillas, rojas o marrones y caer prematuramente de la planta a medida que la deficiencia se vuelve más severa (Hanson y Hancock, 1996). Eck *et al.* (1990) mencionan que en cultivos que se desarrollan bajo un pH ácido, es común encontrar niveles bajos de magnesio en el medio de crecimiento.

En la Figura 2.3.1 también se observa, que las soluciones nutritivas 1 y 6 fueron las más desbalanceadas en Ca y K, y de acuerdo a los datos del Cuadro 2.3.1, fueron las que generaron los niveles más bajos de calcio relativo en la rizósfera, 9.52 y 8.07% respectivamente. Asimismo, se muestra que las soluciones 4 y 5 disminuyeron significativamente los niveles porcentuales de K y Na en el medio de crecimiento, mientras que las soluciones 2 y 3 aumentaron el nivel de Mn. Las diferencias estadísticas fueron menos significativas en el Mg relativo por efecto de las SN's.

Cuadro 2.3.1. Análisis de varianza y comparación de medias de las concentraciones catiónicas relativas de la solución de la rizósfera en plantas de arándano cv. Biloxi desarrolladas en seis soluciones nutritivas de distintas relaciones Ca/Mg/K.

% Ca				% Mg			% K			% NH ₄		
F.V.	F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F	
MAGN	4.36	0.1052		2.36	0.1989		28.86	0.0058		4.48	0.1018	
CATION	29.07	<0.0001		6.14	0.0003		16.70	<0.0001		5.71	0.0005	
MAGN X CATION	4.47	0.0027		4.60	0.0024		6.06	0.0003		3.46	0.0109	
CV (%)	12.68			12.14			9.34			12.83		
Relaciones Ca/Mg/K	SN4	13.85	a	SN5	24.61	a	SN6	20.40	a	SN6	27.33	a
	SN5	13.45	ab	SN1	22.17	ab	SN1	19.05	ab	SN2	25.42	ab
	SN2	11.84	b	SN3	21.98	abc	SN3	18.81	ab	SN1	24.61	ab
	SN3	11.58	b	SN6	21.32	abc	SN2	17.43	bc	SN5	24.15	abc
	SN1	9.52	c	SN2	19.64	bc	SN4	15.86	cd	SN3	22.84	bc
	SN6	8.07	c	SN4	18.46	c	SN5	14.67	d	SN4	20.45	c
DMSH	1.96			3.63			2.21			4.14		

% Na				% Al			% Fe			% Mn		
F.V.	F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F	
MAGN	0.08	0.7916		0.02	0.8845		1.11	0.3524		0.04	0.8572	
CATION	19.21	<0.0001		11.35	<0.0001		3.42	0.0128		13.31	<0.0001	
MAGN X CATION	2.50	0.0461		4.41	0.0035		0.68	0.6436		5.53	0.0013	
CV (%)	11.91			18.21			17.56			16.64		
Relaciones Ca/Mg/K	SN1	16.76	a	SN4	10.06	a	SN2	1.47	a	SN3	0.08	a
	SN6	15.68	ab	SN2	9.40	ab	SN4	1.46	ab	SN2	0.07	a
	SN2	14.71	ab	SN3	7.73	bc	SN6	1.40	abc	SN1	0.07	ab
	SN3	14.02	b	SN1	7.57	bc	SN1	1.18	abc	SN4	0.06	bc
	SN5	11.58	c	SN5	7.21	c	SN5	1.14	bc	SN6	0.05	bc
	SN4	10.88	c	SN6	7.18	c	SN3	1.12	c	SN5	0.05	c
DMSH	2.22			2.15			0.32			0.02		

Nota: valores con la misma letra en la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha = 0.05$). DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; CV: Coeficiente de variación. SN: Solución nutritiva.

Cuadro 2.3.2. Balances Ca/Mg/K/NH₄ de las soluciones nutritivas empleadas y de la condición nutrimental óptima para arándano cv. Biloxi.

Solución nutritiva	Relaciones porcentuales			
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺
SN1	22.00	11.99	21.01	45.00
SN2	19.25	12.98	22.77	45.00
SN3	16.50	13.97	24.53	45.00
SN4	13.75	14.96	26.29	45.00
SN5	11.00	15.95	28.05	45.00
SN6	8.25	16.94	29.81	45.00
SN0 óptima	14.82	27.26	24.50	33.43

Fuente: Elaboración propia.

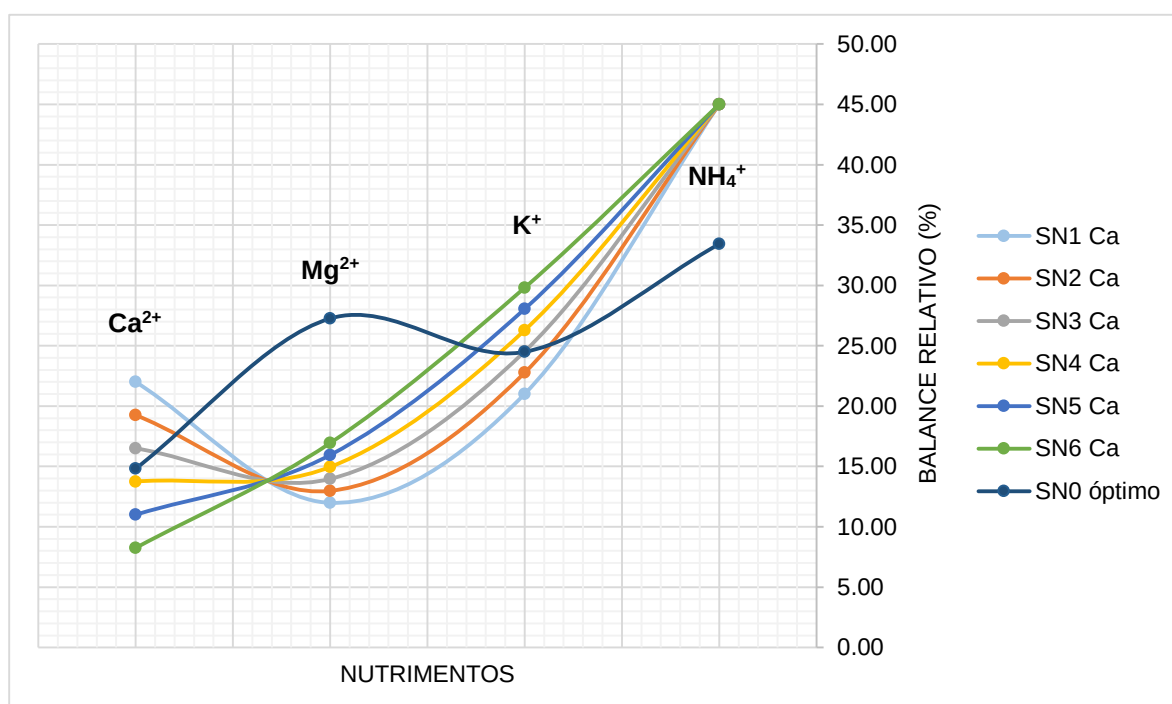


Figura 2.3.1. Balances Ca/Mg/K/NH₄ de las soluciones nutritivas y de la condición nutrimental óptima para arándano cv. Biloxi desarrollado en seis soluciones nutritivas de distintas relaciones Ca/Mg/K.



Figura 2.3.2. Deficiencia de Mg en hojas basales en plantas de arándano cv. Biloxi desarrolladas en seis soluciones nutritivas de distintas relaciones Ca/Mg/K. Las muestras foliares se extrajeron de distintas unidades experimentales.

Según el Cuadro 2.3.1, las SN's no produjeron un efecto significativo en la proporción relativa de Al en la rizósfera. Este elemento representa estadísticamente entre 7 a 10% del balance total de los cationes, muy cercano al nivel porcentual del calcio. Estos valores demuestran la alta capacidad de tolerancia del arándano al aluminio tal como lo establece Korcak (1988). El aluminio soluble determinado es proveniente de la disolución de compuestos hidroxialumínicos presentes en el sustrato organomineral debido al uso de un pH ácido (4.9-5.1) en las soluciones (Mengel y Kirkby, 2000). En analogía con Bache (1985), la concentración de H^+ en una solución de un sustrato o suelo, tiene un efecto importante en la solubilidad de los minerales. Concentraciones altas de H^+ favorecen la intemperización de los minerales, resultando en la liberación

de iones como K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Mn^{2+} , Cu^{2+} y Al^{3+} . La solubilidad de las sales, incluyendo carbonatos (HCO_3^- , CO_3^{2-}), sulfatos (SO_4^{2-}) y fosfatos ($H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-}), es más alta en el rango de pH bajo (4.0-4.5). A este pH la liberación del aluminio, producido por la disolución de compuestos hidroxialumínicos, puede resultar en altos niveles de Al soluble, que son tóxicos para la mayoría de las plantas (Mengel y Kirkby, 2000).

Para Fe y Mn (Cuadro 2.3.1), no se encontraron diferencias significativas que indiquen algún efecto por parte de las SN's empleadas. Las concentraciones registradas de ambos nutrimentos son en promedio de 5.80 y 0.57 $mg \cdot L^{-1}$, respectivamente. Estos valores son congruentes si se comparan con las concentraciones encontradas por Sonneveld y Voorthuyzen (1988) en soluciones de sustrato de lana de roca, donde reportaron valores de 1.26 $mg \cdot L^{-1}$ para Fe y 0.44 $mg \cdot L^{-1}$ para Mn. La diferencia de Fe encontrada, plantea la necesidad de altos requerimientos de este nutrimento en arándano cv. Biloxi, tal como lo sugieren Hanson y Hancock (1996). Para el Mn, la diferencia numérica es inapreciable. Según Fuqua *et al.*, (2005) las deficiencias de manganeso son raras en áreas donde se cultiva arándano. Hart *et al.* (2006) señalan que niveles de este nutrimento cercanos a 450 $mg \cdot L^{-1}$ en tejido foliar son considerados excesivos, especialmente si se presentan por largos periodos. Igualmente reportan que los arándanos de arbustos altos pueden crecer normalmente con concentraciones foliares de hasta 650 $mg \cdot L^{-1}$.

Para las relaciones porcentuales NO_3/NH_4 , NO_3/H_2PO_4 , el pH y la conductividad eléctrica (CE) que se presentan en el Cuadro 2.3.3, se observa que la respuesta del arándano fue similar a lo observado en el balance catiónico Ca/Mg/K/ NH_4 /Na/Al/Fe/Mn. Según los datos, los niveles porcentuales de NO_3 (NO_3/NH_4) en la rizósfera generados por las soluciones nutritivas 4 y 2 fueron estadísticamente los más altos. Por otro lado, la relación Ca/Mg/K empleada en la solución 1 (40.0/21.8/38.2), la cual representa la condición más limitante para los arándanos debido al nivel más alto de Ca utilizado, produjo de manera significativa una relación NO_3/H_2PO_4 distinta al de las demás SN's. Así mismo, fue la solución que generó la CE estadísticamente más alta (3.45 $dS \cdot m^{-1}$) en el medio de crecimiento.

Cuadro 2.3.3. Análisis de varianza y comparación de medias de las relaciones NO_3/NH_4 , $\text{NO}_3/\text{H}_2\text{PO}_4$, pH y CE de la solución de la rizósfera en plantas de arándano cv. Biloxi desarrolladas en seis soluciones nutritivas de distintas relaciones Ca/Mg/K.

% NO_3 (NO_3/NH_4)			% NH_4 (NO_3/NH_4)			pH	
F.V.	F	Pr > F	F	Pr > F	F	Pr > F	
MAGN	2.02	0.2287	2.32	0.2026	4.06	0.1141	
CATION	10.40	<0.0001	9.72	<0.0001	4.75	0.0017	
MAGN X CATION	5.86	0.0006	6.37	0.0002	2.51	0.0453	
CV (%)	20.98		4.94		10.67		
Relaciones Ca/Mg/K	SN4	24.67 a	SN1	88.02 a	SN6	7.07 a	
	SN2	22.48 a	SN6	83.50 ab	SN3	6.99 ab	
	SN3	19.30 ab	SN5	83.40 ab	SN1	6.65 abc	
	SN5	16.58 b	SN3	82.47 ab	SN5	6.55 abc	
	SN6	16.50 b	SN2	79.60 b	SN4	6.07 bc	
	SN1	14.52 b	SN4	77.95 b	SN2	5.88 c	
DMSH	5.73		5.57		0.93		

% NO_3 ($\text{NO}_3/\text{H}_2\text{PO}_4$)			% H_2PO_4 ($\text{NO}_3/\text{H}_2\text{PO}_4$)			CE (dS m^{-1})	
F.V.	F	Pr > F	F	Pr > F	F	Pr > F	
MAGN	1.18	0.3385	1.20	0.3349	1.38	0.3057	
CATION	12.03	<0.0001	13.08	<0.0001	7.03	<0.0001	
MAGN X CATION	1.45	0.2298	1.52	0.2059	1.95	0.1068	
CV (%)	16.21		10.52		26.29		
Relaciones Ca/Mg/K	SN4	48.55 a	SN1	75.24 a	SN1	3.45 a	
	SN2	46.55 ab	SN5	62.91 b	SN5	2.57 b	
	SN3	41.16 abc	SN6	61.87 bc	SN6	2.39 b	
	SN6	38.12 bc	SN3	58.84 bcd	SN3	2.43 b	
	SN5	37.09 cd	SN2	53.45 cd	SN2	2.19 b	
	SN1	28.80 d	SN4	51.45 d	SN4	1.79 b	
DMSH	9.19		8.85		0.88		

Nota: valores con la misma letra en la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha = 0.05$). DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; CV: Coeficiente de variación. SN: Solución nutritiva.

Otro punto importante a considerar, es la tendencia de los valores de la conductividad eléctrica (Cuadro 2.3.3). Los resultados obtenidos (Figura 2.3.1) indican que a medida que una solución nutritiva se aleja de la condición óptima nutrimental, el desbalance produce un mayor efecto salino en el medio de cultivo. Esto resulta útil en la formulación de soluciones nutritivas, ya que el efecto salino se ha minimizado seleccionando fertilizantes de bajo índice salino (Benton, 2005), pero según lo observado en este experimento, también deben tomarse en cuenta los balances nutrimentales.

De acuerdo a lo analizado hasta el momento, las respuestas del arándano en su medio de crecimiento, por efecto de las relaciones catiónicas utilizadas en las SN's, estuvieron sujetas en gran medida a los desbalances nutrimentales, los cuales, fueron establecidos con base al balance promedio de la condición nutrimental óptima de esta especie. Estos resultados sugieren que es posible que en cada especie de planta existe un balance nutrimental óptimo que debe ser considerado en su nutrición, ya que este balance, al representar la condición de máxima eficiencia nutrimental, indica cual es el ambiente iónico más adecuado para el desarrollo de las plantas en condiciones controladas.

2.3.2. Balance catiónico de las células radicales

Los balances de actividad catiónica relativa que se muestran en el Cuadro 2.3.4, representan el equilibrio catiónico producido por las células fisiológicamente activas de la raíz del arándano. El balance producido por las células radicales, además de representar el equilibrio que establece la raíz con su medio de crecimiento, proporciona información acerca del grado de afinidad iónica de las membranas celulares (Tan, 2011).

La solución nutritiva 4 (Cuadro 2.3.4) fue la solución que generó los mayores efectos significativos en las células radicales. Estadísticamente, el mayor equilibrio de Ca y Al se presentó en esta solución, mientras que los menores equilibrios de Ca se registraron en las soluciones 1 y 6. Las soluciones nutritivas 4 y 5 indujeron una disminución significativa de Na en las células; esto también se observó para el Fe por efecto de la solución 1. Por el contrario, las soluciones 2 y 3 produjeron los equilibrios más altos en Mn. El equilibrio de Mg en las células no presentó efectos significativos entre SN's.

Los resultados del Cuadro 2.3.4, como se analizó anteriormente en la Figura 2.3.1, ponen en evidencia los desbalances de cada solución nutritiva aplicada con respecto al balance promedio de la condición nutrimental óptima del arándano.

Cuadro 2.3.4. Análisis de varianza y comparación de medias de las actividades catiónicas relativas de las células radicales fisiológicamente activas en plantas de arándano cv. Biloxi desarrolladas en seis soluciones nutritivas de distintas relaciones Ca/Mg/K.

% Ca				% Mg			% K			% NH ₄		
F.V.	F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F	
MAGN	2.34	0.2011		0.83	0.4133		8.05	0.0470		3.48	0.1353	
CATION	33.68	<0.0001		5.93	0.0004		8.91	<0.0001		5.34	0.0008	
MAGN X CATION	5.79	0.0005		2.49	0.0484		4.59	0.0021		4.65	0.0019	
CV (%)	14.63			17.99			7.74			8.84		
Relaciones Ca/Mg/K	SN4	7.39	a	SN5	12.62	a	SN6	27.84	a	SN6	37.32	a
	SN5	6.10	b	SN3	11.63	ab	SN3	27.50	a	SN5	36.98	ab
	SN2	5.76	b	SN4	10.35	ab	SN1	26.80	a	SN2	36.46	ab
	SN3	5.61	b	SN1	9.78	b	SN4	25.28	ab	SN1	34.47	abc
	SN1	4.32	c	SN2	9.55	b	SN2	25.20	ab	SN3	33.00	bc
	SN6	3.68	c	SN6	9.39	b	SN5	22.76	b	SN4	31.86	c
DMSH	1.10			2.64			2.68			4.14		

% Na				% Al			% Fe			% Mn		
F.V.	F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F	
MAGN	0.51	0.5158		0.18	0.6913		3.17	0.1496		2.79	0.1700	
CATION	15.97	<0.0001		10.08	<0.0001		11.39	<0.0001		16.06	<0.0001	
MAGN X CATION	2.01	0.0979		5.66	0.0008		2.31	0.0685		4.82	0.0032	
CV (%)	8.94			26.10			16.11			16.84		
Relaciones Ca/Mg/K	SN1	23.40	a	SN4	1.70	a	SN4	0.26	a	SN3	0.04	a
	SN6	21.33	ab	SN2	1.49	ab	SN5	0.24	ab	SN2	0.04	ab
	SN2	21.08	ab	SN1	1.20	b	SN2	0.23	abc	SN4	0.03	bc
	SN3	20.68	b	SN5	1.14	b	SN6	0.21	bc	SN1	0.03	c
	SN5	17.93	c	SN3	1.13	b	SN3	0.19	cd	SN6	0.03	c
	SN4	17.27	c	SN6	1.07	b	SN1	0.15	d	SN5	0.03	c
DMSH	2.43			0.49			0.05			0.01		

Nota: valores con la misma letra en la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha = 0.05$). DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; CV: Coeficiente de variación. SN: Solución nutritiva.

El orden descendente promedio del equilibrio catiónico establecido por las membranas de las células radicales se presenta en el Cuadro 2.3.5. El NH_4 , K y Na son los cationes que presentaron un mayor equilibrio en las células. Esto apunta a que el sodio juega un papel en la nutrición del arándano que aún se desconoce. En el caso de Mg y Ca, los datos sugieren una mayor participación del Mg en el equilibrio nutrimental que el Ca. Esto apoya la consideración que indica que los arándanos al catalogarse como plantas calcífugas tienden a ser más eficientes en la absorción del calcio y por lo tanto tienen bajos requerimientos de este nutrimento en comparación con otros frutales (Hart *et al.*, 2006; Hanson y Hancock, 1996).

Por otro lado, los cationes Fe y Mn fueron los que participaron en menor proporción en los niveles de equilibrio, lo que es congruente, ya que ambos son considerados micronutrientes y sus concentraciones en relación a los cationes básicos son decenas de veces menores (Ázcon y Talón, 2013; Marschner, 2012). Las concentraciones foliares de estos elementos en la mayoría de los cultivos se encuentran entre 25-300 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ para Fe (Barker y Stratton, 2015) y de 20-100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ para Mn (Benton, 2005).

Cuadro 2.3.5. Balance catiónico promedio de las células radicales fisiológicamente activas en arándano cv. Biloxi desarrollado en seis soluciones nutritivas de distintas relaciones Ca/Mg/K.

	NH_4^+	K^+	Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Al^{3+}	Fe^{3+}	Mn^{2+}
%	36.17	26.70	20.00	10.10	5.40	1.40	0.20	0.03

El balance que se expone en el Cuadro 2.3.5, al estar expresado en términos de comportamiento ideal, es considerado como el balance iónico más cercano a las condiciones reales de la raíz de la planta. Esto indica que, para arándano, el balance anteriormente mencionado es considerado como el más adecuado para emplear en la formulación de soluciones nutritivas e implica únicamente transformar las proporciones relativas expresadas como actividad química a términos de concentración equivalente, por lo que los cálculos para determinar las cantidades de fertilizante a utilizar, no sufren modificaciones.

2.3.3. Energización y magnetización en las soluciones nutritivas

La información presentada en los Cuadros 2.3.6 y 2.3.7 indica efectos significativos de cambios de energía libre (energización) y cambios de susceptibilidad magnética (magnetización) de los cationes presentes en las soluciones nutritivas empleadas. Estos cambios, fueron distintos para cada SN evaluada, siendo los efectos de magnetización mayores a los de la energización. De la misma manera, el grado de respuesta de los cationes a los campos magnéticos fue estadísticamente diferente entre las SN's.

Con base en los Cuadros 2.3.6 y 2.3.7, los cambios de energía libre fueron significativos en las soluciones 1 y 4, mientras que los cambios de susceptibilidad magnética se presentaron en las soluciones nutritivas 1, 3, 4 y 5. En la solución nutritiva 1 los cationes energizados fueron Ca, K, NH₄, Na y Mn; en la solución 4 se energizaron el K, NH₄ y Na. La magnetización por otro lado, se manifestó en los iones: Ca, K, NH₄, Na, Fe y Mn para la SN 1; Mg y K para la SN 3; K y NH₄ para la SN 4; y Na y Fe para la SN 5. Según esta información, estadísticamente la SN 1 fue la que presentó las mayores respuestas a la aplicación de CM's, contrario a las soluciones 2 y 6, en donde no hubo efecto significativo. La respuesta de la SN 1 puede deberse al contenido de calcio presente en la solución; Wright *et al.* (1992) sugieren que en plantas calcífugas, como los arándanos, altos contenidos de calcio en el medio alteran de manera sustancial el metabolismo en las plantas. También hay que señalar que el Ca, Mg, Fe y Mn fueron los cationes con menores respuestas significativas al CM; el Mg presentó solo un efecto de magnetización en la SN 3, el Ca y Mn fueron energizados y magnetizados únicamente en la SN 1, el Fe por otra parte, solo mostró efectos de magnetización en las SN's 1, 3 y 5.

En este análisis, puede observarse que la respuesta de los cationes en las SN's al factor magnético dependió de los balances nutrimentales establecidos en cada SN, en particular, de la relación Ca/Mg/K. Esta afirmación apunta al hecho de que el equilibrio químico de una solución juega un rol importante en el efecto producido por un CM, y consecuentemente, será un factor determinante de las condiciones termodinámicas presentes.

Cuadro 2.3.6. Análisis de varianza y contrastes de la energía libre catiónica de las soluciones nutritivas aplicadas a plantas de arándano cv. Biloxi con y sin tratamiento magnético.

ΔG Ca (kJ)				ΔG Mg (kJ)				ΔG K (kJ)				ΔG NH ₄ (kJ)			
F.V.	F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F				
MAGN	0.43	0.5468		0.66	0.4621		4.81	0.0934		2.77	0.1713				
CATION	11.79	<0.0001		4.70	0.0018		15.26	<0.0001		9.96	<0.0001				
MAGN X CATION	3.80	0.0065		1.26	0.3001		3.33	0.0131		3.13	0.0177				
CV (%)	2.46			5.07			3.80			5.16					
Contrastes	Pr > F			Pr > F			Pr > F			Pr > F					
SN1-NM vs SN1-M	-17.95	-18.85	-	0.0027	-15.78	-16.50	ns	-13.13	-13.98	-	0.0210	-12.41	-13.47	-	0.0282
SN2-NM vs SN2-M	-18.69	-18.29	+	0.1693	-17.38	-17.07	ns	-14.57	-15.01	-	0.2190	-13.89	-13.75	+	0.7635
SN3-NM vs SN3-M	-18.11	-18.60	-	0.0903	-16.96	-16.23	ns	-14.05	-14.58	-	0.1415	-13.89	-13.91	-	0.9733
SN4-NM vs SN4-M	-18.56	-18.05	+	0.0793	-17.63	-17.49	ns	-14.91	-16.09	-	0.0019	-14.12	-15.88	-	0.0005
SN5-NM vs SN5-M	-17.84	-17.56	+	0.3376	-16.18	-16.41	ns	-14.96	-14.51	+	0.2067	-13.53	-13.56	-	0.9444
SN6-NM vs SN6-M	-19.13	-19.33	-	0.4865	-16.88	-17.70	ns	-14.14	-13.85	+	0.4265	-13.35	-13.22	+	0.7694

ΔG Na (kJ)				ΔG Al (kJ)				ΔG Fe (kJ)				ΔG Mn (kJ)			
F.V.	F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F				
MAGN	0.82	0.4161		0.28	0.6261		3.38	0.1399		18.89	0.0122				
CATION	13.84	<0.0001		9.09	<0.0001		1.83	0.1290		4.42	0.0027				
MAGN X CATION	2.68	0.0352		1.98	0.1018		2.11	0.0846		2.81	0.0122				
CV (%)	4.78			2.11			1.92			3.65					
Contrastes	Pr > F			Pr > F			Pr > F			Pr > F					
SN1-NM vs SN1-M	-13.33	-14.48	-	0.0164	-22.87	-22.11	ns	-25.69	-26.78	ns	-29.02	-31.89	-	0.0002	
SN2-NM vs SN2-M	-15.27	-15.08	+	0.0677	-21.69	-21.87	ns	-26.26	-26.39	ns	-31.07	-30.58	+	0.4875	
SN3-NM vs SN3-M	-14.97	-15.15	-	0.7056	-22.29	-22.20	ns	-26.49	-26.97	ns	-31.17	-31.43	-	0.7156	
SN4-NM vs SN4-M	-15.99	-17.00	-	0.0331	-21.37	-21.03	ns	-26.39	-26.80	ns	-31.45	-31.79	-	0.6291	
SN5-NM vs SN5-M	-15.73	-15.07	+	0.1608	-21.83	-21.98	ns	-26.57	-26.50	ns	-31.50	-31.91	-	0.5557	
SN6-NM vs SN6-M	-14.89	-14.50	+	0.3986	-21.80	-22.16	ns	-26.28	-26.08	ns	-32.81	-32.47	+	0.6291	

Nota: CV: Coeficiente de variación; ns: no significativo. SN: Solución nutritiva. NM: No magnetizada. M: Magnetizada. En los contrastes el signo (+) significa aumento y el signo (-) disminución.

Cuadro 2.3.7. Análisis de varianza y contrastes de la susceptibilidad magnética catiónica de las soluciones nutritivas aplicadas a plantas de arándano cv. Biloxi con y sin tratamiento magnético.

Ca (cm³)				Mg (cm³)				K (cm³)				NH₄ (cm³)				
F.V.	F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F					
MAGN	0.18	0.6935		0.27	0.6294		9.72	0.0356		6.46	0.0638					
CATION	11.63	<0.0001		7.57	<0.0001		10.82	<0.0001		7.82	<0.0001					
MAGN X CATION	3.17	0.0168		2.80	0.0332		3.95	0.0062		5.94	0.0005					
CV (%)	17.48			17.11			18.87			22.01						
Contrastes				Pr > F				Pr > F				Pr > F				
SN1-NM vs SN1-M	0.030	0.022	-	0.0051	0.020	0.017	-	0.0518	0.105	0.076	-	0.0040	-0.128	-0.071	+	0.0001
SN2-NM vs SN2-M	0.022	0.026	+	0.1804	0.014	0.014	+	0.6431	0.065	0.052	-	0.0965	-0.064	-0.076	-	0.2789
SN3-NM vs SN3-M	0.030	0.025	-	0.0840	0.013	0.019	+	0.0069	0.076	0.054	-	0.0181	-0.068	-0.074	-	0.5790
SN4-NM vs SN4-M	0.026	0.029	+	0.2108	0.014	0.012	-	0.3294	0.060	0.039	-	0.0223	-0.072	-0.038	+	0.0048
SN5-NM vs SN5-M	0.032	0.035	+	0.2511	0.020	0.020	-	0.8188	0.055	0.066	+	0.1602	-0.082	-0.092	-	0.3996
SN6-NM vs SN6-M	0.018	0.018	+	0.8566	0.016	0.018	+	0.1832	0.074	0.079	+	0.3973	-0.091	-0.093	-	0.8631

Na (cm³)				Al (cm³)				Fe (cm³)				Mn (cm³)			
F.V.	F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F				
MAGN	3.44	0.1372		0.15	0.7186		59.71	0.0015		0.96	0.3828				
CATION	7.73	<0.0001		9.95	<0.0001		3.50	0.0113		15.49	<0.0001				
MAGN X CATION	5.09	0.0017		1.80	0.1343		3.28	0.0157		9.98	<0.0001				
CV (%)	21.54			16.01			13.79			17.24					
Contrastes				Pr > F				Pr > F				Pr > F			
SN1-NM vs SN1-M	0.062	0.035	-	0.0007	0.002	0.002	ns	0.400	0.281	-	0.0001	0.004	0.002	-	0.0001
SN2-NM vs SN2-M	0.033	0.038	+	0.3038	0.003	0.003	ns	0.320	0.320	+	0.9326	0.002	0.002	+	0.4454
SN3-NM vs SN3-M	0.043	0.034	-	0.1034	0.002	0.002	ns	0.322	0.249	-	0.0049	0.002	0.002	+	0.6521
SN4-NM vs SN4-M	0.029	0.021	-	0.1379	0.003	0.004	ns	0.309	0.283	-	0.3131	0.002	0.002	-	0.3829
SN5-NM vs SN5-M	0.033	0.044	+	0.0204	0.003	0.003	ns	0.304	0.236	-	0.0266	0.002	0.002	-	0.1517
SN6-NM vs SN6-M	0.042	0.047	+	0.3268	0.003	0.002	ns	0.319	0.328	+	0.6679	0.001	0.002	+	0.0888

Nota: CV: Coeficiente de variación; ns: no significativo. SN: Solución nutritiva. NM: No magnetizada. M: Magnetizada. En los contrastes el signo (+) significa aumento y el signo (-) disminución.

Además, es importante indicar que no solo los balances químicos son importantes en las soluciones nutritivas, sino también los requerimientos nutrimentales de los cultivos, que como se sabe, son distintos entre especies vegetales (Mengel y Kirkby, 2000). Lo anterior explica, por lo menos en parte, porque se ha encontrado una gran variabilidad en las respuestas de los cultivos al emplear CM's en el agua de riego o en las SN's (Hachicha *et al.*, 2018; Surendran *et al.*, 2016; Haq *et al.*, 2016; El Sayed y El Sayed, 2014; Grewal y Maheshwari, 2011).

Por lo tanto, las condiciones termodinámicas de la solución nutritiva son las que establecerán el nivel de acoplamiento energético entre la solución y el CM. Kobe *et al.* (2003) sugieren que el grado de respuesta depende de la amplitud del campo aplicado y del equilibrio químico de la solución. Según Markov (1994) si dicha amplitud es igual a la cantidad de energía necesaria para generar efectos (energización o magnetización), la SN alcanza un estado energético estacionario en la que puede permanecer durante un cierto período de tiempo. Si no se alcanza este estado energético, ya sea por falta o exceso de energía, se produce un estado energético distinto, produciendo que la SN intercambie intensivamente energía con el medio ambiente disminuyendo o anulando los efectos producidos, tal como sucedió en las soluciones 2, 3, 5 y 6.

El mecanismo teórico que más se aproxima para explicar este acoplamiento de energía es el propuesto por Cefalas *et al.* (2008). Estos autores plantean que, durante el flujo turbulento del líquido, en este caso una solución nutritiva, los iones presentes forman diminutos campos electromagnéticos que entran en interacción con el campo magnético externo produciendo un acoplamiento y una transferencia de energía entre el estado cinético del flujo y el campo magnético. Posteriormente, las líneas magnéticas del CM externo siguen la dirección del flujo del líquido, creándose una fluctuación electromagnética que se va amplificando exponencialmente hasta lograr una distribución y polarización de las moléculas del agua, así como de los iones disueltos, alterando de esta manera el fenómeno de hidratación iónica (Mosin e Ignatov, 2014) y produciendo una mejor disolución y distribución de los solutos en el agua (Hachicha *et al.*, 2018). De acuerdo a Pang y Deng (2008), esto se logra a través de cambios en los momentos dipolares y estados vibracionales de los átomos, así como por la variación

energética de los electrones. Aunque este planteamiento es meramente teórico, los resultados estadísticos expuestos en este trabajo, así como en otros estudios (Silva *et al.*, 2015; Fathi *et al.*, 2006; Holysz *et al.*, 2003; Lungader, 1995) apoyan el hecho de que existen efectos de interacción entre las soluciones y los campos magnéticos, dando como respuesta cambios fisicoquímicos en los iones disueltos.

Se han realizado algunos trabajos acerca del efecto de los CM's en las plantas bajo condiciones de hidroponia. Haq *et al.* (2016) determinaron el efecto en nabo al utilizar una solución nutritiva (solución de Hoagland al 50%) tratada magnéticamente. Utilizaron agua potable para elaborar la SN y un CM de 211 mT aplicado a 30, 45 y 60 min. Los resultados mostraron que los tratamientos con solución magnetizada aumentaron la germinación, el índice de emergencia, el índice de vigor, longitud de plántulas, pesos frescos y secos, contenido de clorofila y contenido proteico; también incrementaron las actividades enzimáticas de la α -amilasa y la proteasa durante la germinación. En otro estudio, El Sayed y El Sayed (2014) llevaron a cabo dos experimentos en macetas en condiciones de invernadero e hidroponía (solución de Hoagland) con la finalidad de estudiar el impacto del uso de soluciones nutritivas magnetizadas en plantas de haba utilizando un dispositivo magnético (Magnetic Funnel - Magnetic Technologies Dubai, UAE, LLC. Patent No. 1826921). Los autores reportan aumentos significativos en la altura de planta, peso fresco y seco de hojas, tallo y raíz, y en el área foliar, por efecto de las SN's magnetizadas. Asimismo, se observaron incrementos significativos en la cantidad de pigmentos fotosintéticos (clorofila a, clorofila b y carotenoides), actividad fotosintética, carbohidratos totales disponibles (monosacáridos, disacáridos, polisacáridos), proteína total, aminoácidos totales, actividad enzimática antioxidante (catalasa, peroxidasa y superóxido dismutasa) y aumentos en la concentración de K, Ca y P en raíces, tallos, hojas y semillas. Grewal y Maheshwari (2011) estudiaron el efecto del tratamiento magnético (3.5-163 mT) del agua de riego en semillas de chícharo y garbanzo. En ambas especies encontraron que, el agua magnetizada condujo a un aumento significativo en el índice de emergencia, peso seco de tallo y en el contenido de N, K, Ca, Mg, S, Na, Zn, Fe y Mn en brotes y raíces en comparación con el testigo.

2.4. Conclusiones

Las plantas de arándano cv. Biloxi realizaron ajustes al balance nutrimental catiónico y aniónico en la solución nutritiva de la rizósfera mostrando una tendencia que refleja la condición óptima donde se obtiene la mayor eficiencia de absorción nutrimental.

La relación Ca/Mg/K (40.0/21.8/38.2) con la concentración máxima de calcio en plantas de arándano cv. Biloxi produjo desajustes significativos en el balance catiónico y aniónico de la solución de la rizósfera, apoyando al hecho de que el arándano se encuentre clasificado dentro del grupo de especies calcífugas.

En arándano cv. Biloxi, el uso de soluciones nutritivas altamente desbalanceadas con respecto al balance promedio requerido por la condición nutrimental óptima produjo incrementos importantes en la conductividad eléctrica de la solución nutritiva de la rizósfera.

El orden descendente porcentual del equilibrio catiónico producido en las células fisiológicamente activas de la raíz del arándano cv. Biloxi, en promedio fue de 36.2, 26.7, 20.0, 10.1, 5.4, 1.4, 0.2 y 0.03 % para NH_4 , K, Na, Mg, Ca, Al, Fe y Mn, respectivamente.

Se produjeron efectos de energización y magnetización en los cationes NH_4 , K, Na, Mg, Ca, Fe y Mn, sin embargo, la repuesta del arándano fue distinta en cada solución nutritiva empleada y no fue posible generalizar efectos específicos, esto significa que el balance iónico de las soluciones nutritivas es un factor importante en la respuesta a la aplicación de un campo magnético.

La actividad química es la expresión más adecuada para definir la participación de los nutrimentos en la solución nutritiva, tiene relación directa con los sistemas biológicos, explica la absorción nutrimental y respuestas en crecimiento y desarrollo de la planta.

2.5. Literatura citada

- Austin, M. E. & Gaines, T. P. (1984). An observation of nutrient levels in old, unfertilized rabbiteye blueberry plants. *Horticultural Science*, 19:417-418.
- Ázcon B., J. & Talón, M. (2013). *Fundamentos de fisiología vegetal*. 2da ed. México. McGraw-Hill Interamericana. 651 pp.
- Bache, D.T. (1985). Soil acidification and aluminium mobility. *Soil Use and Management*, 1:10-14.
- Barnhisel, R. & Bertsch, P. M. (1982). *Aluminum* (pp. 275-300). In: Page, A. L. (ed.), *Methods of soil analysis, Part 2: chemical and microbiological properties*. USA. American Society of Agronomy.
- Barker, A. V. & Stratton, M. L. (2015). *Iron* (399-426). In: Barker, A. V. and Pilbeam, D. J. (eds.), *Handbook of plant nutrition*. 2nd ed. USA. CRC Press.
- Benton J., J. (2005). *Hydroponics: a practical guide for the soilless grower*. USA. CRC Press. 423 pp.
- Cefalas, A. C., Kobe, S., Dražic, G., Sarantopoulou, E., Kollia, Z., Stražišar, J. & Meden, A. (2008). Nanocrystallization of CaCO_3 at solid/liquid interfaces in magnetic field: A quantum approach. *Applied Surface Science*, 254:6715-6724.
- Chang, R. (2008). *Fisicoquímica*. 3ra ed. México. McGraw-Hill Interamericana. 1018 pp.
- Eck, P., Gough, R. E., Hall, I. V. & Spiers, J. M. (1990). *Blueberry management* (pp. 273-333). In: Galletta, G. J. and Himelrick, D. G. (eds.), *Small fruit crop management*. USA. Prentice Hall.
- El Sayed, H. & El Sayed, A. (2014). Impact of magnetic water irrigation for improve the growth, chemical composition and yield production of broad bean (*Vicia faba* L.) plant. *Nature and Science*, 13:107-119.
- Fathi, A., Mohamed, T., Claude, G., Maurin, G., & Mohamed, B. A. (2006). Effect of a magnetic water treatment on homogeneous and heterogeneous precipitation of calcium carbonate. *Water Research*, 40:1941-1950.
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura, FIRA. (2016). *Panorama agroalimentario: Berries 2016*. México. Dirección de Investigación y Evaluación Económica Sectorial, FIRA. 41 pp.
- Fuqua, B., Byers, P., Kaps, M., Kovacs, L. & Waldstein, D. (2005) *Growing blueberries in Missouri*. USA. Missouri State University. Bulletin 44. 47 pp.

- Grewal, H. S. & Maheshwari, B. L. (2011). Magnetic treatment of irrigation water and snow pea and chickpea seeds enhances early growth and nutrient contents of seedlings. *Bioelectromagnetics*, 32:58-65.
- Hachicha, M., Kahlaoui, B., Khamassi N., Misle E. & Jouzdan, O. (2018). Effect of electromagnetic treatment of saline water on soil and crops. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17:154-162.
- Hanson, E. J. & Hancock, J. F. (1996). *Managing the nutrition of highbush blueberries*. USA. Michigan State University Extension. Bulletin E-2011. 6 pp.
- Haq, Z., Iqbal, M., Jamil, Y., Anwar, H., Younis, A., Arif, M., M. Zeshan, F. & Hussain F. (2016). Magnetically treated water irrigation effect on turnip seed germination, seedling growth and enzymatic activities. *Information Processing In Agriculture*, 3:99-106.
- Hart, J., Strik, B., White, L. & Yang, W. (2006). *Nutrient management for blueberries in Oregon*. USA. Oregon State University Extension Service. Publication Num. EM 8918. 14 pp.
- Haynes, W. M., Lide, D. R. & Bruno, T. J. (2017). *Magnetic susceptibility of the elements and inorganic compounds (section 4, pp. 126-131)*. In; Haynes, W. M. (ed), CRC Handbook of Chemistry and Physics. 97th ed. USA. CRC Press.
- Hirzel, C. J. (2010). *Acumulación de nutrientes en frutos de arándano*. Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Consultado el 10 de marzo del 2020. <https://www.redagricola.com/cl/acumulacion-nutrientes-frutos-arandano/>.
- Hołysz, L., Chibowski, E. & Szcześ, A. (2003). Influence of impurity ions and magnetic field on the properties of freshly precipitated calcium carbonate. *Water Research*, 37:3351-3360.
- Jiménez, M., Carpenter, F., Molinar, R. H., Wright, K. & Day, K. R. (2005). Blueberry research launches exciting new California specialty crop. *California Agriculture*, 59:65-69.
- Pietruszewski, S. & Kania, K. (2010). Effect of magnetic field on germination and yield of wheat. *International Agrophysics*, 24:297-302.
- Kobe, S., Dražić, G., McGuinness, P. J., Meden, T., Sarantopoulou, E., Kollia, Z. & Cefalas, A. C. 2003. Control over nanocrystalization in turbulent flow in the presence of magnetic fields. *Materials Science and Engineering C*, 23:811-815.

- Korcak, R. F. (1988) *Nutrition of blueberry and other calcifuges* (pp. 183-227). In: Janick J. (ed.), *Horticultural Reviews* Vol. 10. USA. Timber Press.
- Lungader M., H. E. (1995). Influence of magnetic field on the precipitation of some inorganic salts. *Journal Crystal Growth*, 152:94-100.
- Markov M. S. (1994). *Biological effects of extremely low frequency magnetic fields* (pp. 91-104). Biomagnetic Stimulation. Ueno S. (ed.). USA. Springer.
- Marschner, P. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. 3rd edition. USA. Elsevier, Academic Press. 651 pp.
- Mengel, K. & Kirkby, E. (2000). *Principios de nutrición vegetal* (Ricardo J. Melgar, ed. y trad.). Alemania. 1ra edición. Instituto Internacional del Potasio. 608 pp.
- Mosin, O. & Ignatov, I. (2014). Basic concepts of magnetic water treatment. *Nanotechnology Research and Practice*. 4:187-200.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO. (2019). *Estadísticas, FAOSTAT*. Disponible en <http://www.fao.org/faostat/es/#data>
- Pang, X. F. & Deng, B. (2008). The changes of macroscopic features and microscopic structures of water under influence of magnetic field. *Physica B: Condensed Matter*, 403:3571-3577.
- Pineda P. J., Avitia G. E., Castillo G. A. M., Corona T. T., Valdez A. L. A. & Gómez H. J. (2008). Extracción de macronutrientes en frambueso rojo. *Terra Latinoamerica*, 26:333-340.
- Ratnaparkhe, M. B. (2007). *Blueberry* (pp. 217-227). In: Kole C. (ed.), *Fruits and nuts. Genome mapping and molecular breeding in plants*. Vol. 4. USA. Springer.
- Retamales, J. B. & Hancock, J. F. (2018). *Blueberries*. 2nd Edition. Crop production science in horticulture series. USA. CABI. 411 pp.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000*. México. SEMARNAT. 73 pp.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SIAP. (2018). *Atlas agroalimentario 2012-2018* (pp. 34-35). México. SAGARPA.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SIAP. (2019). *Panorama agroalimentario 2019* (pp. 32-33). México. SAGARPA.
- Silva, I. B., Queiroz N., J. C. & Petri D., F. S. (2015). The effect of magnetic field on ion hydration and sulfate scale formation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 465:175-183.

- Sonneveld, C & Voorthuyzen, E. (1988). *Monsterfout en analysefout bij het chemisch onderzoek van voedingsoplossingen in steenwolmatten*. The Netherlands. Proefstation voor Tuinbouw onder Glas. Intern rapport. No. 10. 13 pp.
- Steiner, A. A. (1961). A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil*, 15:34-154.
- Steiner, A. A. (1966). The influence of the chemical composition of a nutrient solution on the production of tomato plants. *Plant and Soil*, 24:454-466.
- Steiner, A. A. (1980). The selective capacity of plants for ions and its importance for the composition and treatment of the nutrient solution. *Acta Horticulturae*, 98:87-97.
- Steiner, A. A. (1984). *The universal nutrient solution* (pp. 633-650). Proceedings of IWOSC 1984. The Netherlands. 6th International Congress on Soilless Culture.
- Surendran, U., Sandeep, O. & E. J., J. (2016). The impacts of magnetic treatment of irrigation water on plant, water and soil characteristics. *Agricultural Water Management*, 178:21-29.
- Tan, K. H. (2011). *Principles of soil chemistry*. 4th ed. USA. CRC Press. 362 pp.
- Trehane, J. (2004). *Blueberries, cranberries and others vacciniums*. USA. Timber Press. 256 pp.
- Wright, G. C., Patten, K. D. & Drew, M. C. (1992). Salinity and supplemental calcium influence growth of rabbiteye and southern highbush blueberry. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 117:749-756.

**CAPÍTULO III. RELACIONES Ca/Mg/K Y SOLUCIÓN NUTRITIVA
MAGNETIZADA EN LA PRODUCCIÓN DE ARÁNDANO AZUL
(*Vaccinium* spp.) CV. BILOXI BAJO CONDICIONES DE
HIDROPONIA**

RELACIONES Ca/Mg/K Y SOLUCIÓN NUTRITIVA MAGNETIZADA EN LA PRODUCCIÓN DE ARÁNDANO AZUL (*Vaccinium* spp.) CV. BILOXI BAJO CONDICIONES DE HIDROPONIA

Resumen

El arándano es uno de los cultivos que se ha incorporado recientemente en los sistemas de producción en México debido a su alta rentabilidad. Sin embargo, a pesar del gran auge que ha tenido la producción de arándano en la última década, la información sobre sus características fisiológicas y nutrimentales ha sido deficiente limitando su productividad. El propósito de este trabajo fue formular seis soluciones nutritivas (SN's) con niveles descendentes de calcio establecidas a través de la relación Ca/Mg/K y evaluar sus efectos sobre pigmentos fotosintéticos (clorofilas a, b, total y carotenoides), concentraciones nutrimentales en distintos órganos de la planta (raíz, hoja y fruto), calidad del fruto (pH, CE, antocianinas y sólidos solubles totales) y rendimiento en arándano cv. Biloxi. Este trabajo también incluyó un estudio sobre la influencia de la aplicación de campos magnéticos (CM's) en la solución nutritiva, técnica que ha dado resultados favorables en varios cultivos. Los resultados mostraron que las dosis de calcio utilizadas en las SN's generaron cambios significativos en las concentraciones del N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn y B en raíz, hoja y fruto. Los órganos más afectados fueron el fruto y la raíz en macronutrientes y micronutrientes, respectivamente. El nivel más alto y más bajo de calcio produjeron los pH's más ácidos en el fruto. De manera similar, los dos niveles más altos y más bajos de Ca aumentaron la concentración de antocianinas en fruto. La dosis más alta de Ca incrementó significativamente la cantidad de sólidos solubles totales. Los efectos fueron menos evidentes en las clorofilas a, b y total, carotenoides, y en la CE del fruto. La solución con la concentración mínima de calcio produjo la mayor producción de frutos con calidad suprema y de primera, sin efectos significativos en frutos de segunda. Las respuestas al factor magnético fueron variables, lo que no permitió precisar efectos específicos, sin embargo, hubo cambios significativos en algunas variables debido a la interacción entre las SN's y los CM's.

Palabras clave: arándano, soluciones nutritivas, calcio, campos magnéticos

Ca/Mg/K RATIOS AND MAGNETIZED NUTRIENT SOLUTION IN THE PRODUCTION OF BLUEBERRY (*Vaccinium* spp.) CV. BILOXI UNDER HYDROPONIC CONDITIONS

Abstract

Blueberry is one of the crops that has recently been incorporated in Mexico's production systems due to its high profitability. However, despite great upgrade blueberry production in the last decade, information on physiological and nutritional blueberry characteristics has been deficient, limiting its productivity. The purpose of this work was to formulate six nutrient solutions (NS's) with descending calcium levels established through the Ca/Mg/K ratio and it evaluate its effects on photosynthetic pigments (chlorophylls, b, total and carotenoids), nutritional concentrations in different plant organs (root, leaf and fruit), fruit quality (pH, CE, anthocyanins and total soluble solids) and yield in blueberry cv. Biloxi. This work also included a study about the influence of the application of magnetic fields (MF's) in the nutrient solution, a technique that has given favorable results in various crops. Results showed calcium levels in NS's generated significant effects on N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn and B concentrations in root, leaf and fruit. Fruit and root were organs affected in more proportion for macronutrients and micronutrients, respectively. The highest and lowest calcium level produced low pH's in fruit. Similarly, the two highest and two lowest levels increased anthocyanins concentration in fruit. The highest calcium concentration significantly increased total soluble solids. Effects were less evident on chlorophylls a, b and total, carotenoids, and EC in fruit. Minimum calcium concentration in nutrient solution produced the highest supreme and first fruit production, without significant effects in second fruits. Responses of magnetic factor were diverse, which didn't allow establishing specific effects, however, there were significant effects on some variables due to interaction between NS's and MF's.

Keywords: blueberry, nutrient solutions, calcium, magnetic fields

3.1. Introducción

El cultivo de frutillas es una de las actividades de mayor rentabilidad en el sector agrícola mexicano y cuenta con una demanda creciente a nivel nacional e internacional. Esta expansión se ha extendido en una gran diversidad de ambientes y ha traído consigo el uso de prácticas culturales innovadoras (FIRA, 2016). Actualmente, México se posiciona entre los mayores productores y exportadores de frutillas del mundo (SIAP, 2019).

El arándano, en su contexto internacional, es la frutilla que más dinamismo ha mostrado en su comercio. Entre los años 2003 y 2012, el volumen de las exportaciones mundiales de arándanos presentó una tasa de crecimiento promedio anual de 10%, siendo los principales países exportadores de arándanos en ese periodo Estados Unidos, Canadá y Polonia (FIRA, 2016). En 2018, México figuró como 5° productor mundial de esta frutilla con un aporte de 40,251 t (FAO, 2019).

Generalmente, la producción de arándano en México se ha realizado bajo un marco de producción basado en el uso de sistemas hidropónicos, un modelo de producción capaz de aumentar la eficiencia del agua y los nutrimentos en los cultivos y de disminuir el riesgo por pérdidas. A pesar de que la eficiencia de riego en estos sistemas es mucho mayor en comparación con los que se aplican a campo abierto, la utilización excesiva de insumos agrícolas lo hace ser, desde un punto de vista ambiental, una actividad poco atractiva (Pineda *et al.*, 2008).

Los arándanos se consideran plantas calcífugas, debido a que crecen y se desarrollan de manera óptima en suelos ácidos en los que la concentración de calcio es baja. Estos suelos se caracterizan principalmente por presentar un pH menor a 5.5, baja capacidad de intercambio catiónico y baja saturación de bases (Shen *et al.*, 2006). La solubilidad de varios iones metálicos potencialmente tóxicos como Al, Mn y Fe aumenta a medida que disminuye el pH, mientras que varios nutrimentos, como P, K, Ca, Mg y Mo se vuelven deficientes debido a la lixiviación, precipitación o fijación química (Lee, 1999). El pH también afecta la transformación de las fuentes inorgánicas de N en el suelo provocando bajas tasas de nitrificación, lo que da como resultado, que la forma predominante del nitrógeno sea el NH_4^+ (Zhao *et al.*, 2014; Lee, 1999). Debido a estas

condiciones edáficas el arándano ha desarrollado adaptaciones fisiológicas y nutrimentales totalmente distintas al de la mayoría de las especies cultivables (Korcak, 1988).

Se dice que los arándanos son eficientes en la absorción y utilización del calcio y por lo tanto tienen bajos requerimientos de este nutrimento en comparación con otros frutales (Austin y Gaines, 1984). Presenta concentraciones foliares de 0.3 a 0.8% de calcio (Hanson y Hancock, 1996). Son plantas tolerantes a altas concentraciones de aluminio y manganeso; son eficientes en la absorción de hierro y están adaptadas para utilizar el amonio como forma predominante de nitrógeno (Korcak, 1988).

Debido a que el calcio es uno de los nutrimentos determinantes en la nutrición y producción del arándano (Retamales y Hancock, 2018), este trabajo consistió en estudiar seis soluciones nutritivas (SN's) con niveles descendentes de calcio y una relación constante Mg/K, modificando uno de los balances críticos más importantes en la nutrición vegetal, la relación Ca/Mg/K (Steiner, 1980). Como estudio adicional, se evaluaron los efectos producidos por el uso de campos magnéticos (CM's) en las soluciones nutritivas, ya que en diversos trabajos se han reportado efectos benéficos del uso de agua tratada magnéticamente en los cultivos (Hachicha *et al.*, 2018; Surendran *et al.*, 2016; Haq *et al.*, 2016; Grewal y Maheshwari, 2011).

La respuesta del agua al tratamiento magnético se debe principalmente a sus propiedades diamagnéticas que fueron descubiertas por los trabajos de Ueno e Iwasaka (1994 a, b). De acuerdo a la física electrodinámica, un CM actúa sobre la estructura del agua, dándole propiedades que crean una mejor disolución y distribución de los solutos en el agua, que resulta en los efectos observados a nivel macroscópico (Hachicha *et al.*, 2018), como una mejor distribución del agua en el suelo (Mostafazadeh *et al.*, 2011) y una mayor absorción de nutrimentos por las plantas (Hachicha *et al.*, 2018; El Sayed y El Sayed, 2014; Grewal y Maheshwari, 2011).

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Localización

El experimento se desarrolló entre noviembre de 2018 y noviembre de 2019 en un invernadero tipo túnel, con cubierta plástica de un 75% de transmitancia de luz, ubicado en las coordenadas 19° 29' 22.0" latitud N y 98° 52' 20.5" longitud W, dentro de las instalaciones del Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo.

3.2.2. Tratamientos y diseño experimental

Se empleó un diseño de tratamientos bifactorial (2x6), el cual se formó por la combinación de dos niveles de magnetización (0 y 350 mT) y seis soluciones nutritivas con niveles descendentes de calcio, dando un total de 12 tratamientos. Cada tratamiento tuvo seis repeticiones y se dispusieron en un diseño experimental de parcelas divididas. Las unidades experimentales utilizadas estuvieron compuestas por una planta de arándano cv. Biloxi de cuatro años de edad trasplantado en un contenedor de plástico bicolor de 30 L con una mezcla compuesta de perlita, turba y fibra de coco como sustrato en proporción 1:1:1.

Utilizando los fundamentos del método universal de Steiner (1984), se prepararon soluciones nutritivas a pH de 4.9-5.1, conductividad eléctrica (CE) de 1.65-1.75 dS·m⁻¹ y una relación NO₃/NH₄ 30/70. Los niveles de calcio se definieron considerando la relación Ca/Mg/K; se varió el nivel de Ca y se ajustaron proporcionalmente los niveles de Mg y K para que la relación Mg/K permaneciera constante (0.57). Las relaciones Ca/Mg/K empleadas fueron: 40.0/21.8/38.2 (S1), 35.0/23.6/41.4 (S2), 30.0/25.4/44.6 (S3), 25.0/27.2/47.8 (S4), 20.0/29.0/51.0 (S5) y 15.0/30.8/54.2 (S6).

Para la magnetización del agua se utilizaron imanes comerciales de ferrita de forma rectangular con dimensiones de 83x55x8 mm y una intensidad magnética de 350 mT (especificación técnica del fabricante; Abastecedora Universal de Magnéticos, UNIMAN). El dispositivo magnético utilizado para tratar la solución nutritiva consistió de ocho imanes dispuestos en dos placas longitudinales conectadas N-S, separadas a una distancia de 2.0 a 2.5 cm aproximadamente. Con base en el tiempo de influencia del campo magnético con la solución nutritiva durante el flujo (7.5 - 8.5 s) y utilizando la

fórmula de dosis de exposición absoluta propuesta por Pietruszewski y Kania (2010), la densidad de energía absoluta de interacción estimada fue de $365.6\text{-}414.3 \text{ KJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$.

3.2.3. Variables evaluadas

Las variables evaluadas fueron clorofila a, clorofila b, clorofila total, carotenoides, concentraciones de nutrimentos en raíz, hoja y fruto, calidad del fruto (pH, CE, antocianinas y sólidos solubles totales, SST) y rendimiento por planta. Las variables respuesta se analizaron de la siguiente manera:

Clorofila a, clorofila b, clorofila total y carotenoides. Se determinaron de acuerdo a la técnica descrita por Witham *et al.* (1971) seleccionándose cuatro plantas de arándano por tratamiento. Se recolectaron de 6 a 8 hojas de reciente maduración, se colocaron en bolsas de plástico transparente dentro de un contenedor de unicel y se agregaron hielos con el propósito de mantener el material vegetal a bajas temperaturas y minimizar alteraciones en la composición química de las muestras durante el traslado. Las hojas de cada muestra se lavaron con agua destilada, se retiró el exceso de agua con una franela limpia y se dejaron secar a temperatura ambiente por cinco minutos. Las hojas se cortaron en trozos pequeños con una tijera limpia y se homogeneizaron. Posteriormente en una balanza analítica se pesaron 0.7 g de tejido foliar y se colocaron en un mortero, se adicionó 7 mL de acetona al 80% y se maceraron. Los extractos obtenidos se transfirieron a tubos de ensaye con tapa, los cuales se colocaron en una gradilla forrada con plástico negro para evitar incidencia de luz. Los tubos se almacenaron por 24 h a bajas temperaturas y en oscuridad. Transcurrido el tiempo, se realizaron diluciones de los extractos con micropipeta. Se tomó 1 mL de cada extracto, se transfirió a un tubo de ensaye y se aforó a 10 mL con acetona al 80%. Finalmente, se determinó la absorbancia a 470, 645, 646 y 663 nm utilizando un espectrofotómetro de luz ultravioleta marca Thermo Scientific modelo Genesys 10uv. Los cálculos para determinar la concentración de los pigmentos fotosintéticos fueron los siguientes (Wellburn, 1994; Witham *et al.*, 1971):

$$\text{Clorofila a } (\mu\text{g mL}^{-1}) = 12.21 \text{ Abs}_{663} - 2.81 \text{ Abs}_{646}$$

$$\text{Clorofila b } (\mu\text{g mL}^{-1}) = 20.13 \text{ Abs}_{646} - 5.03 \text{ Abs}_{663}$$

$$\text{Clorofila total } (\mu\text{g mL}^{-1}) = 20.20 \text{ Abs}_{645} - 8.02 \text{ Abs}_{663}$$

$$\text{Carotenoides } (\mu\text{g mL}^{-1}) = \frac{1000 \text{ Abs}_{470} - 3.27 \text{ Clor a} - 104 \text{ Clor b}}{198}$$

Para expresar las concentraciones $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ en $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ de peso fresco en hoja cada valor se multiplicó por el siguiente factor:

$$\frac{V \times \text{FD}}{1000 \times P}$$

Dónde: V es el volumen de acetona al 80% empleado para la maceración expresado en mL; P es el peso en g de tejido foliar fresco utilizado; y FD el factor de dilución para la lectura en el espectrofotómetro de luz ultravioleta.

Concentraciones de nutrimentos de raíz, hoja y fruto. La recolección y procesamiento de raíces, hojas y frutos se realizaron en fechas distintas. El método de recolección de estos órganos se efectuó como se describe a continuación; a) raíces: se seleccionaron cuatro plantas de arándano por tratamiento; utilizando una cuchillo de acero inoxidable se extrajeron muestras de raíz de las unidades experimentales procurando que estas fueran de volúmenes similares y se les realizó un lavado con la finalidad de quitar el exceso de sustrato; las muestras lavadas se colocaron en una bolsa de plástico transparente y se mezclaron para formar una muestra compuesta; se procesaron cuatro submuestras en el laboratorio; b) hojas: se seleccionaron cuatro repeticiones por tratamiento; en cada una se recolectaron de 30 a 40 hojas por planta, las más recientemente maduras, justo debajo del punto de crecimiento, se colocaron en bolsas de papel y se transportaron al laboratorio para su procesamiento; c) fruto: se seleccionaron cinco repeticiones por tratamiento; se tomaron muestras de 50 g en frutos de la penúltima cosecha. Los pasos subsecuentes a la recolección fueron los mismos en todos los órganos extraídos.

En laboratorio cada muestra obtenida se pasó por un tren de lavado de cuatro tiempos con agua destilada. Las muestras limpias se acomodaron en bolsas de papel craft y se dejaron secar por 72 h en horno de secado por convección de aire forzado marca Binder

modelo ED400 a una temperatura de 70 °C. Cada muestra seca se molió en un molino de acero inoxidable marca Thomas Wiley Mill modelo ED-5 para reducir su tamaño y homogeneizar. En matraces kjeldal se les realizó una digestión húmeda colocando 0.5 g de materia seca, 4 mL de una mezcla diácida (ácido sulfúrico: ácido perclórico, relación 4:1 v/v) y 2 mL de peróxido de hidrógeno grado reactivo, después se colocaron en una plancha de digestión marca Lindberg a una temperatura de 250-300 °C para lograr una oxidación completa de la muestra. Concluido el proceso, los digestados se enfriaron, se transfirieron a matraces volumétricos de 50 mL, en donde fueron aforados con agua destilada, y se guardaron en frascos de plásticos en oscuridad y temperatura ambiente.

A partir de los digestados se llevaron a cabo los análisis correspondientes de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn y B se utilizándose las metodologías propuestas por la NOM-021-SEMARNAT-2000. El N se determinó por el método microKjeldahl de destilación simple (Benton, 2001); se tomó una alícuota de 20 mL por cada muestra digestada y se vació en un matraz kjeldahl, se le adicionó 20 mL de NaOH al 30% y se conectó al flujo de vapor; rápidamente se colocó un matraz Erlenmeyer al final del tubo del refrigerante, al cual, se le agregó previamente 10 mL de una solución de ácido bórico mezclado con dos indicadores (verde de bromocresol y rojo de metilo); se destiló hasta que el volumen del frasco Erlenmeyer alcanzó la marca de los 75 mL; posteriormente, se determinó el nitrógeno amoniacal presente en el destilado titulándolo con ácido sulfúrico 0.05 N. Para la determinación de P se usó el método de desarrollo de color vanadato-molibdato (Jackson, 1964); se tomaron 5 mL por muestra que se transfirieron a un matraz aforado de 50 mL; a cada matraz se le agregó 10 mL de ácido nítrico 2 N y 5 mL de una mezcla vanadato-molibdato y se aforaron a 50 mL con agua destilada; asimismo, se elaboró la curva patrón de P a las concentraciones de 0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0 y 12.5 mg·L⁻¹ respectivamente; se dejaron reposar por aproximadamente una hora y se realizaron lecturas de absorbancia a 420 nm utilizando un espectrofotómetro de luz ultravioleta marca Thermo Scientific modelo Genesys 10uv. El K se determinó por flamometría en un equipo Sherwood modelo 410 y los cationes Ca, Mg, Fe, Mn, Cu y Zn con un espectrofotómetro de absorción atómica GBC modelo Avanta. El B fue determinado por colorimetría con el método azometina-H; de cada digestado se tomó un volumen de 2 mL y se transfirió a un tubo de ensaye; se adicionaron 2 mL de una solución

amortiguadora, compuesta por acetato de amonio, EDTA disódica y ácido acético glacial, más 1 mL de azometina; utilizando el mismo procedimiento se elaboró la curva patrón de B a 0.5, 1, 2, 4, 6, 8 y 10 mg·L⁻¹; los tubos se agitaron y se dejaron reposar por aproximadamente una hora; transcurrido el tiempo se realizaron las lecturas correspondientes con un espectrofotómetro UV marca Thermo Scientific modelo Genesys 10uv a una absorbancia de 420 nm.

Posteriormente, se realizaron los cálculos respectivos para expresar las concentraciones de los macronutrientes en términos porcentuales de materia seca (m.s.) y los micronutrientes en mg·kg⁻¹ m.s. Las fórmulas utilizadas fueron:

$$\% N = \frac{(\text{mL H}_2\text{SO}_4_{\text{muestra}} - \text{mL H}_2\text{SO}_4_{\text{blanco}}) \times N_{\text{H}_2\text{SO}_4} \times 14 \times \text{mL}_{\text{aforados en digestión}}}{\text{mL}_{\text{alícuota}} \times \text{g}_{\text{m.s. digestada}} \times 10}$$

$$\% P, K, Ca, Mg = \frac{(\text{mg L}^{-1}_{\text{muestra}} - \text{mg L}^{-1}_{\text{blanco}}) \times F1_{\text{dilución}} \times F2_{\text{dilución}} \times \text{mL}_{\text{aforados en digestión}}}{\text{g}_{\text{m.s. digestada}} \times 10000}$$

$$\text{mg kg}^{-1} \text{ Fe, Mn, Cu, Zn, B} = \frac{(\text{mg L}^{-1}_{\text{muestra}} - \text{mg L}^{-1}_{\text{blanco}}) \times F1_{\text{dilución}} \times F2_{\text{dilución}} \times \text{mL}_{\text{aforados en digestión}}}{\text{g}_{\text{m.s. digestada}}}$$

Calidad del fruto. Se midieron parámetros de calidad en fruto usando de 4 a 5 repeticiones por tratamiento. Se realizaron 5 muestreos de fruto para determinar pH y CE, 4 muestreos en antocianinas y 6 en sólidos solubles totales (SST), durante el transcurso del experimento, con la finalidad de disminuir el error experimental atribuido al estado de maduración del fruto en planta en el muestreo, que de acuerdo a Forney *et al.* (2009), es un factor determinante en la calidad y vida postcosecha del arándano. Según Defilippi *et al.* (2013) la maduración de frutos de arándano presenta un comportamiento climatérico, caracterizado por incremento en respiración y producción de etileno, sin embargo, a diferencia de otros frutos climatéricos, los arándanos deben cosecharse cercanos a madurez de consumo ya que los atributos organolépticos (sabor) no mejoran después de cosecha. Moggia (1991) indica que el contenido de azúcar no cambia después de que los frutos son cosechados.

El pH y CE se midieron en 15 g de fruto macerado y diluido en agua destilada en proporción 1:2 utilizando un potenciómetro marca Hanna modelo HI991301. Los SST o grados Brix (g de sacarosa disueltos en 100 mL) se cuantificaron con un refractómetro analógico marca BINKO con rango de medición de 0-32 °Bx, empleándose para ello de 8 a 10 frutos de calidad suprema y primera. Para la determinación del contenido de antocianinas se empleó la metodología propuesta por Giusti y Wrolstad (2001); se pesaron 2 g de material fresco provenientes de 4 a 5 frutos, se maceraron con 20 mL de metanol acidificado 0.01% (v/v), se transfirieron a frascos color ámbar y se dejaron reposar durante 24 horas en oscuridad y a 4 °C; transcurrido el tiempo, de cada frasco se tomaron dos alícuotas de 1 mL y se colocaron en tubos de ensaye para sus diluciones respectivas; en un tubo de ensaye se agregaron 19 mL de KCl 0.025 M a pH 1.0 y en el otro 19 mL de CH₃COONa 0.4 M a pH 4.5; las diluciones se estabilizaron por 15 min y finalmente se midió la absorbancia a 520 y 700 nm con un espectrofotómetro UV marca Thermo Scientific modelo Genesys 10uv. El contenido de antocianinas se calculó como mg equivalentes de cianidin 3-glucósido por cada 100 g de peso fresco, de la siguiente manera:

$$\text{Antocianinas totales (mg 100 g}^{-1} \text{ p.f.)} = \frac{A \times 449.2 \times F_{\text{dilución}} \times 1000}{26900}$$

$$A = (A_{520} - A_{700})_{\text{pH 1.0}} - (A_{520} - A_{700})_{\text{pH 4.5}}$$

Rendimiento de fruto por planta. El rendimiento se cuantificó por tamaño para establecer una categorización del fruto. Se utilizaron las categorías A, B y C correspondientes a calidades suprema, primera y segunda, respectivamente; las categorías se definieron utilizando el diámetro de fruto de la siguiente manera: A > 17 mm, B 17 - 10 mm y C < 10 mm tamizando con cribas de metal con el diámetro señalado. Durante el experimento se efectuaron 20 cosechas con intervalos de 15 a 30 días según el comportamiento de la maduración de los frutos; se utilizó el color de la superficie del fruto como indicador de la madurez.

3.2.4. Análisis de datos

Los datos obtenidos se procesaron estadísticamente utilizando el programa SAS 9.0. En cada variable evaluada se realizó un análisis de varianza, una comparación múltiple

de medias utilizando la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$), y una comparación de grupos de tratamientos usando el método de contrastes. Para las variables de calidad en fruto, el análisis estadístico se efectuó como un diseño de parcelas subdivididas tomando el muestreo como parcela grande, el magnetismo como parcela mediana y las relaciones Ca/Mg/K de las soluciones nutritivas como parcela chica.

3.3. Resultados y discusión

3.3.1. Pigmentos fotosintéticos

De acuerdo al Cuadro 3.3.1 y con la excepción del nivel más alto de calcio S1, no hubo diferencias estadísticas significativas en la concentración de clorofila a, clorofila b, clorofila total y carotenoides para ningún nivel de calcio en las soluciones nutritivas. Efectos similares han sido reportados por los estudios de Wright *et al.* (1993) en arándano cv. Sharpblue. La baja concentración de pigmentos fotosintéticos producidos por la S1 se explica por el alto contenido de calcio utilizado y por los efectos antagónicos sobre el Mg (Barber, 1995), el cual, es un componente estructural de las clorofilas que son las responsables de la fotosíntesis (Marschner, 2012). Alrededor del 20% del Mg total en las hojas se encuentra en los cloroplastos; de este porcentaje, solo del 10 al 20% se encuentra en las moléculas de clorofila, el resto se localiza en forma iónica en el espacio intratilacoidal, que al absorber luz pasa al estroma, donde activa enzimas importantes como la Rubisco, el fosfoenol-piruvato carboxilasa y la glutamato sintasa (Ázcon y Talón, 2013). Navarro y Navarro (2003) mencionan que los antagonismos entre Ca, Mg y K no suelen presentarse cuando existe un balance adecuado entre estos.

La baja respuesta del arándano a las dosis de calcio se debe probablemente a que estas plantas son eficientes en la absorción de este nutrimento (Retamales y Hancock, 2018). Esta afirmación conlleva al hecho de que han desarrollado mecanismos que le ayudan a regular de forma eficiente excesos o deficiencias de calcio en el medio de crecimiento. Además, sus adaptaciones evolutivas a suelos ácidos, medios en donde las concentraciones de bases intercambiables están altamente desbalanceadas (Zhao *et al.*, 2014), le confieren una alta capacidad para ajustar desequilibrios nutrimentales en especial para cationes básicos como Ca, Mg y K (Retamales y Hancock, 2018; Korcak, 1988).

Cuadro 3.3.1. Pigmentos fotosintéticos en plantas de arándano cv. Biloxi desarrollado en seis soluciones nutritivas de distintas relaciones Ca/Mg/K con y sin tratamiento magnético.

Clorofila a (mg g ⁻¹ p.f.)				Clorofila b (mg g ⁻¹ p.f.)				Clorofila total (mg g ⁻¹ p.f.)				Carotenoides (mg g ⁻¹ p.f.)				
F.V.	F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F					
MAGN	0.37	0.5765		0.18	0.6912		0.07	0.8094		0.55	0.4990					
CATION	4.36	0.0029		4.32	0.0031		4.34	0.0030		4.36	0.0029					
MAGN X CATION	4.18	0.0038		3.30	0.0137		4.34	0.0059		4.03	0.0047					
CV (%)	6.51			7.90			6.84			5.97						
Magnetismo	NM	1.84	ns	M	0.66	ns	NM	2.78	ns	NM	0.46	ns				
	M	1.83	ns	NM	0.66	ns	M	2.77	ns	M	0.46	ns				
DMSH	0.04			0.02			0.07			0.01						
Relaciones Ca/Mg/K o niveles de calcio	S5	1.93	a	S5	0.69	a	S5	2.92	a	S5	0.48	a				
	S4	1.88	a	S2	0.68	a	S2	2.85	a	S4	0.47	a				
	S2	1.88	a	S4	0.67	a	S4	2.83	a	S2	0.46	ab				
	S6	1.82	ab	S6	0.66	ab	S6	2.76	ab	S6	0.45	ab				
	S3	1.81	ab	S3	0.66	ab	S3	2.74	ab	S3	0.45	ab				
	S1	1.70	b	S1	0.59	b	S1	2.56	b	S1	0.43	b				
DMSH	0.16			0.07			0.25			0.04						
Contrastes	Pr > F			Pr > F			Pr > F			Pr > F						
S1-NM vs S1-M	1.79	1.62	-	0.0249	0.63	0.56	-	0.0412	2.69	2.42	-	0.0286	0.45	0.41	-	0.0223
S2-NM vs S2-M	1.94	1.81	-	0.0955	0.70	0.66	-	0.3103	2.93	2.76	-	0.1407	0.48	0.45	-	0.1243
S3-NM vs S3-M	1.87	1.74	-	0.0736	0.68	0.64	-	0.1955	2.84	2.65	-	0.1004	0.46	0.43	-	0.0481
S4-NM vs S4-M	1.83	1.93	+	0.1798	0.65	0.68	+	0.3593	2.76	2.91	+	0.2217	0.46	0.49	+	0.0899
S5-NM vs S5-M	1.82	2.03	+	0.0062	0.65	0.73	+	0.0114	2.75	3.08	+	0.0072	0.46	0.50	+	0.0193
S6-NM vs S6-M	1.79	1.85	+	0.3752	0.63	0.68	+	0.1234	2.70	2.82	+	0.2918	0.45	0.46	+	0.4623

Nota: valores con la misma letra en la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha = 0.05$). DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; CV: Coeficiente de variación. ns: no significativo. S: Solución. NM: No magnetizado. M: Magnetizado. En los contrastes el signo (+) significa aumento y el signo (-) disminución.

Según los datos del Cuadro 3.3.1, en promedio las plantas de arándano presentaron concentraciones de 1.84, 0.66, 2.78 y 0.46 mg·g⁻¹ de clorofila a, clorofila b, clorofila total y carotenoides, respectivamente, en tejido fresco de hoja. No es posible hacer una comparación de estos valores con otros trabajos debido a que, para determinaciones de clorofilas en cultivos, de manera convencional ya sea por practicidad o costo, se han usado medidores de clorofila SPAD cuyos rangos de valores son distintos a los obtenidos en este trabajo. Aung *et al.* (2014) reportan valores de 47.42, 58.91 y 49.15 unidades SPAD en arándano, correspondientes a los cultivares Blueray, Misty y Sharpblue, respectivamente.

El factor magnético (Cuadro 3.3.1), solo generó cambios significativos en las soluciones nutritivas 1 y 5 magnetizadas. Como puede observarse, la respuesta magnética fue resultado de la interacción entre el CM aplicado y la SN. Para la S1-M, el uso de campos magnéticos disminuyó significativamente la concentración de clorofila a, clorofila b, clorofila total y carotenoides, mientras que en la S5-M estas aumentaron. En el primer caso, la disminución puede deberse a que el CM modificó el estado energético del Ca y por consecuencia su reactividad (Coey, 2012); se plantea un efecto magnético más alto en el Ca que en el Mg y K debido a las mayores proporciones utilizadas en esta solución. Sin embargo, no mejoró el contenido de pigmentos fotosintéticos, solo acentuó el efecto antagónico del Ca sobre el Mg. Este efecto antagónico fue menor en la S5-M al disminuir el nivel de calcio en la solución, logrando un incremento significativo en el contenido de clorofilas y carotenoides. Sin embargo, con este nivel de calcio en S5 tanto las plantas magnetizadas como no magnetizadas experimentaron cierto estrés hídrico producido por algunas complicaciones en el suministro del riego durante el experimento, por lo que esta afirmación es incierta. Se han encontrado incrementos significativos en los contenidos de clorofila en plantas de nabo en condiciones de hidroponía en donde se utilizó una solución nutritiva (Hoagland al 50%) magnetizada a 211 mT (Haq *et al.*, 2016). Moussa (2011) reporta resultados similares en pigmentos fotosintéticos de frijol utilizando agua tratada con un dispositivo magnético de 30 mT.

3.3.2. Concentraciones de nutrimentos

Con base en los datos de los Cuadros 3.3.2, 3.3.3, 3.3.4, 3.3.5, 3.3.6 y 3.3.7 las concentraciones de macro y micronutrimentos fueron distintos entre los órganos

evaluados. Las concentraciones nutrimentales promedio fueron: 1.44 % N, 0.28 % P, 0.42 % K, 0.27 % Ca, 0.22 % Mg, 166.3 mg·kg⁻¹ Fe, 329.7 mg·kg⁻¹ Mn, 33.1 mg·kg⁻¹ Cu, 68.6 mg·kg⁻¹ Zn y 109.7 mg·kg⁻¹ B en raíz; 1.47 % N, 0.11 % P, 1.27 % K, 0.59 % Ca, 0.13 % Mg, 306.1 mg·kg⁻¹ Fe, 285.7 mg·kg⁻¹ Mn, 59.1 mg·kg⁻¹ Cu, 18.4 mg·kg⁻¹ Zn y 602.9 mg·kg⁻¹ B en hoja; y 0.48 % N, 0.05 % P, 0.64 % K, 0.22 % Ca, 0.05 % Mg, 26.2 mg·kg⁻¹ Fe, 23.4 mg·kg⁻¹ Mn, 10.7 mg·kg⁻¹ Cu, 3.0 mg·kg⁻¹ Zn y 80.8 mg·kg⁻¹ B en fruto. Estos valores permitieron establecer gradientes de concentración nutrimental en raíz, N > K > P ≈ Ca > Mg > Mn > Fe > B > Zn > Cu; en hoja, N > K > Ca > P ≈ Mg > B > Fe ≈ Mn > Cu > Zn; y en fruto, K > N > Ca > P ≈ Mg > B > Fe ≈ Mn > Cu > Zn. Como puede observarse, el fruto fue el órgano que tuvo la menor concentración de nutrientes contrario a la raíz y la hoja, los cuales, presentaron las mayores concentraciones de N, P, Mg, Mn y Zn en raíz; y N, K, Ca, Fe, Cu y B en hoja.

Para el siguiente análisis es importante señalar que las unidades experimentales del tratamiento S5 presentaron ligeras condiciones de estrés hídrico debido a algunas complicaciones presentadas durante el experimento. Esto es considerado en la discusión con el propósito de no llegar a afirmaciones erróneas. Según la información presentada en los Cuadros 3.3.2, 3.3.3, 3.3.4, 3.3.5, 3.3.6 y 3.3.7, y omitiendo los resultados del nivel de calcio en S5, no se encontraron efectos significativos de P, K, Ca, Mg y Cu en raíz, P, Ca, Mg, Fe y Cu en hoja, y N, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn y B en fruto. La baja variación en la concentración de calcio de los distintos órganos sugiere una alta capacidad del arándano a regular los niveles de calcio en los tejidos, independientemente de las concentraciones del nutrimento en el medio de crecimiento, lo que es acorde con la observación de diversos autores (Retamales y Hancock, 2018; Hanson y Hancock, 1996; Korcak, 1988) de ser una planta muy eficiente en el uso de este elemento. Por otro lado, se observaron incrementos estadísticamente significativos en las concentraciones de N, K y B en hoja y de P en fruto por efecto de las soluciones con los niveles bajos en calcio, principalmente para las soluciones S5 y S6; estos aumentos se deben a una disminución de los efectos antagónicos del Ca con estos nutrimentos. Se han reportado numerosas interacciones del Ca con otros elementos minerales, entre los más importantes, K, Na, Mg, Al y NH₄ (Fageria, 2009; Castellanos, 2000).

Cuadro 3.3.2. Concentraciones de macronutrientes en raíz de plantas de arándano cv. Biloxi desarrolladas en seis soluciones nutritivas de distintas relaciones Ca/Mg/K con y sin tratamiento magnético.

% N				% P				% K				% Ca				% Mg			
F.V.	F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F					
MAGN	0.04	0.8203		0.15	0.7285		3.43	0.1612		12.04	0.0404		3.87	0.1440					
CATION	32.31	<0.0001		6.20	0.0005		2.50	0.0533		16.05	<0.0001		6.75	0.0003					
MAGN X CATION	22.10	<0.0001		19.83	<0.0001		5.45	0.0012		12.05	<0.0001		9.31	<0.0001					
CV	3.56			5.90			8.62			6.89			6.72						
Magnetismo	NM	1.44	ns	M	0.28	ns	NM	0.43	ns	NM	0.29	a	NM	0.22	ns				
	M	1.44	ns	NM	0.28	ns	M	0.41	ns	M	0.27	b	M	0.21	ns				
DMSH	0.07			0.01			0.03						0.02						
Relaciones Ca/Mg/K o niveles de calcio	S4	1.63	a	S5	0.30	a	S2	0.44	ns	S2	0.31	a	S4	0.23	a				
	S1	1.46	b	S2	0.29	ab	S5	0.44	ns	S4	0.30	ab	S2	0.22	ab				
	S5	1.46	b	S1	0.28	ab	S4	0.42	ns	S6	0.30	ab	S6	0.22	abc				
	S3	1.40	bc	S4	0.27	b	S3	0.41	ns	S1	0.29	ab	S1	0.21	abc				
	S6	1.37	c	S3	0.27	b	S6	0.40	ns	S3	0.27	bc	S3	0.20	bc				
	S2	1.34	c	S6	0.27	b	S1	0.39	ns	S5	0.24	c	S5	0.20	c				
DMSH	0.08			0.03			0.06						0.02						
Contrastes	Pr > F			Pr > F			Pr > F			Pr > F			Pr > F						
S1-NM vs S1-M	1.31	1.61	+	<0.0001	0.27	0.29	+	0.1061	0.38	0.41	+	0.2312	0.28	0.30	+	0.0418			
S2-NM vs S2-M	1.33	1.36	+	0.3599	0.29	0.29	+	0.8304	0.42	0.46	+	0.2312	0.31	0.33	+	0.0179			
S3-NM vs S3-M	1.41	1.38	-	0.3599	0.25	0.29	+	0.0044	0.42	0.39	-	0.2312	0.29	0.25	-	0.1539			
S4-NM vs S4-M	1.65	1.61	-	0.3088	0.26	0.28	+	0.0898	0.45	0.41	-	0.1885	0.37	0.25	-	<0.0001			
S5-NM vs S5-M	1.57	1.34	-	<0.0001	0.36	0.25	-	<0.0001	0.50	0.38	-	<0.0001	0.24	0.24	-	0.0323			
S6-NM vs S6-M	1.39	1.34	-	0.2150	0.25	0.28	+	0.0075	0.39	0.41	+	0.5460	0.29	0.30	+	0.3899			

Nota: valores con la misma letra en la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha = 0.05$). DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; CV: Coeficiente de variación. ns: no significativo. S: Solución. NM: No magnetizado. M: Magnetizado. En los contrastes el signo (+) significa aumento y el signo (-) disminución.

Cuadro 3.3.3. Concentraciones de macronutrientes en hoja de plantas de arándano cv. Biloxi desarrolladas en seis soluciones nutritivas de distintas relaciones Ca/Mg/K con y sin tratamiento magnético.

% N				% P				% K				% Ca				% Mg				
F.V.	F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F						
MAGN	2.43	0.2167		27.22	0.0137		0.81	0.4334		5.97	0.0922		9.00	0.0577						
CATION	6.92	0.0002		7.31	0.0002		6.78	0.0003		1.82	0.1399		5.64	0.0009						
MAGN X CATION	5.85	0.0007		2.09	0.0957		5.62	0.0010		2.73	0.0376		4.53	0.0034						
CV	4.86			9.07			14.65			6.82			12.50							
Magnetismo	M	1.49	ns	M	0.12	a	M	1.29	ns	NM	0.60	ns	NM	0.13	ns					
	NM	1.45	ns	NM	0.11	b	NM	1.24	ns	M	0.57	ns	M	0.12	ns					
DMSH	0.08			0.01			0.20			0.04			0.01							
Relaciones Ca/Mg/K o niveles de calcio	S6	1.56	a	S5	0.14	a	S6	1.43	a	S2	0.61	ns	S5	0.15	a					
	S3	1.55	a	S6	0.13	ab	S5	1.43	a	S4	0.60	ns	S6	0.13	ab					
	S5	1.46	ab	S4	0.12	abc	S4	1.38	a	S6	0.60	ns	S1	0.12	ab					
	S4	1.45	ab	S2	0.12	bc	S3	1.24	ab	S3	0.59	ns	S4	0.12	b					
	S1	1.41	b	S1	0.11	bc	S1	1.07	b	S5	0.57	ns	S2	0.12	b					
	S2	1.38	b	S3	0.11	c	S2	0.99	b	S1	0.56	ns	S3	0.11	b					
DMSH	0.11			0.02			0.29			0.06			0.02							
Contrastes	Pr > F			Pr > F			Pr > F			Pr > F			Pr > F							
S1-NM vs S1-M	1.45	1.37	-	0.0051	0.12	0.11	-	0.2110	1.03	1.11	+	0.5771	0.57	0.55	-	0.3512	0.12	0.13	+	0.7614
S2-NM vs S2-M	1.37	1.45	+	0.1804	0.12	0.12	-	0.7215	1.13	0.97	-	0.2181	0.64	0.58	-	0.0483	0.12	0.11	-	0.5445
S3-NM vs S3-M	1.57	1.53	-	0.0840	0.10	0.11	+	0.3055	1.21	1.28	+	0.5771	0.59	0.60	+	0.8333	0.12	0.10	-	0.0260
S4-NM vs S4-M	1.35	1.56	+	0.2108	0.12	0.12	+	0.4454	1.43	1.33	-	0.4569	0.65	0.55	-	0.0007	0.12	0.12	-	0.6574
S5-NM vs S5-M	1.50	1.42	+	0.2511	0.13	0.15	+	0.1028	1.53	1.33	-	0.1428	0.57	0.57	+	0.9510	0.17	0.13	-	0.0021
S6-NM vs S6-M	1.50	1.63	+	0.8566	0.12	0.14	+	0.0049	1.11	1.76	+	<0.0001	0.59	0.61	+	0.5874	0.11	0.15	+	0.0049

Nota: valores con la misma letra en la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha = 0.05$). DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; CV: Coeficiente de variación. ns: no significativo. S: Solución. NM: No magnetizado. M: Magnetizado. En los contrastes el signo (+) significa aumento y el signo (-) disminución.

Cuadro 3.3.4. Concentraciones de macronutrientes en fruto de plantas de arándano cv. Biloxi desarrolladas en seis soluciones nutritivas de distintas relaciones Ca/Mg/K con y sin tratamiento magnético.

		% N			% P			% K			% Ca			% Mg		
F.V.		F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F	
MAGN		1.48	0.2910		0.81	0.4180		1.99	0.2316		12.12	0.0253		0.12	0.7475	
CATION		3.80	0.0069		10.20	<0.0001		3.53	0.0102		8.93	<0.0001		6.10	0.0003	
MAGN X CATION		3.05	0.0207		5.41	0.0008		5.59	0.0006		4.25	0.0038		5.97	0.0004	
CV		6.22			11.84			8.28			6.60			5.62		
Magnetismo	M	0.49	ns		M	0.06	ns		NM	0.64	ns		NM	0.22	ns	
	NM	0.47	ns		NM	0.05	ns		M	0.64	ns		M	0.22	ns	
DMSH		0.02			0.01			0.02			0.01			0.01		
Relaciones Ca/Mg/K o niveles de calcio	S5	0.50	a		S6	0.06	a		S6	0.69	a		S2	0.24	a	
	S6	0.50	a		S5	0.06	ab		S2	0.65	ab		S3	0.23	a	
	S3	0.48	ab		S1	0.05	bc		S5	0.64	ab		S1	0.23	a	
	S1	0.48	ab		S2	0.05	bc		S4	0.63	ab		S4	0.22	a	
	S4	0.47	ab		S4	0.05	c		S3	0.61	b		S6	0.22	a	
	S2	0.44	b		S3	0.05	c		S1	0.60	b		S5	0.20	b	
DMSH		0.04			0.01			0.07			0.02			0.01		
Contrastes				Pr > F			Pr > F						Pr > F			Pr > F
S1-NM vs S1-M	0.48	0.47	-	0.4696	0.05	0.05	+	0.5040	0.60	0.59	-	0.7296	0.23	0.22	-	0.2825
S2-NM vs S2-M	0.44	0.45	+	0.5709	0.05	0.05	-	0.8220	0.67	0.62	-	0.1929	0.24	0.22	-	0.0108
S3-NM vs S3-M	0.48	0.49	+	0.7152	0.04	0.05	+	0.1917	0.59	0.64	+	0.1779	0.24	0.23	-	0.1622
S4-NM vs S4-M	0.45	0.49	+	0.0464	0.04	0.05	+	0.0206	0.63	0.64	+	0.8145	0.22	0.21	-	0.1500
S5-NM vs S5-M	0.51	0.47	-	0.0894	0.06	0.05	-	0.0014	0.70	0.54	-	<0.0001	0.18	0.21	+	0.0033
S6-NM vs S6-M	0.47	0.52	+	0.0059	0.06	0.07	+	0.0129	0.64	0.73	+	0.0082	0.23	0.21	-	0.0103

Nota: valores con la misma letra en la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha = 0.05$). DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; CV: Coeficiente de variación. ns: no significativo. S: Solución. NM: No magnetizado. M: Magnetizado. En los contrastes el signo (+) significa aumento y el signo (-) disminución.

Cuadro 3.3.5. Concentraciones de micronutrientos en raíz en plantas de arándano cv. Biloxi desarrolladas en seis soluciones nutritivas de distintas relaciones Ca/Mg/K con y sin tratamiento magnético.

mg L ⁻¹ Fe				mg L ⁻¹ Mn				mg L ⁻¹ Cu				mg L ⁻¹ Zn				mg L ⁻¹ B			
F.V.	F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F					
MAGN	4.17	0.1339		0.25	0.6504		13.01	0.0366		0.19	0.6945		7.73	0.0689					
CATION	12.68	<0.0001		41.50	<0.0001		14.44	<0.0001		25.92	<0.0001		5.60	0.0009					
MAGN X CATION	9.01	<0.0001		15.83	<0.0001		32.32	<0.0001		18.30	<0.0001		19.33	<0.0001					
CV	12.55			6.39			10.29			11.43			13.38						
Magnetismo	M	179.61	ns	NM	330.93	ns	NM	34.92	a	NM	68.63	ns	M	113.36	ns				
	NM	152.98	ns	M	328.43	ns	M	31.22	b	M	68.54	ns	NM	106.12	ns				
DMSH	33.08			33.23			3.70			15.44			8.29						
Relaciones Ca/Mg/K o niveles de calcio	S6	192.75	a	S4	373.31	a	S2	38.25	a	S1	90.89	a	S1	120.09	a				
	S5	185.40	ab	S1	363.88	a	S6	37.03	a	S2	72.58	b	S6	117.37	a				
	S2	179.78	ab	S5	352.50	a	S4	33.86	ab	S3	68.75	b	S2	115.04	a				
	S3	160.28	bc	S2	345.95	a	S3	33.00	ab	S4	68.33	b	S4	113.49	a				
	S1	137.78	c	S3	301.45	b	S1	30.03	bc	S5	65.18	b	S5	105.73	ab				
	S4	136.37	c	S6	246.30	c	S5	25.98	c	S6	48.58	c	S3	86.71	b				
DMSH	32.14			32.50			5.32			12.09			22.32						
Contrastes	Pr > F			Pr > F			Pr > F			Pr > F			Pr > F						
S1-NM vs S1-M	129.60	145.95	+	0.3148	387.15	340.60	-	0.0070	24.85	37.99	+	<0.0001	75.90	113.47	+	<0.0001			
S2-NM vs S2-M	147.90	211.65	+	0.0004	387.30	304.60	-	<0.0001	37.10	39.40	+	0.3545	87.75	57.40	-	<0.0001			
S3-NM vs S3-M	147.30	173.25	+	0.1148	300.85	302.05	+	0.9413	35.25	30.75	-	0.0754	76.15	61.35	-	0.0270			
S4-NM vs S4-M	124.05	127.75	+	0.6435	345.36	407.30	+	0.0005	52.04	21.65	-	<0.0001	70.50	66.15	-	0.5007			
S5-NM vs S5-M	211.20	159.60	-	0.0029	318.70	386.30	+	0.0002	24.55	27.40	+	0.2528	54.30	76.05	+	0.0018			
S6-NM vs S6-M	157.80	227.70	+	0.0001	262.85	229.75	-	0.0489	41.45	32.60	-	0.0010	47.15	50.00	+	0.6584			

Nota: valores con la misma letra en la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha = 0.05$). DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; CV: Coeficiente de variación. ns: no significativo. S: Solución. NM: No magnetizado. M: Magnetizado. En los contrastes el signo (+) significa aumento y el signo (-) disminución.

Cuadro 3.3.6. Concentraciones de micronutrientos en hoja de plantas de arándano cv. Biloxi desarrolladas en seis soluciones nutritivas de distintas relaciones Ca/Mg/K con y sin tratamiento magnético.

		mg L ⁻¹ Fe			mg L ⁻¹ Mn			mg L ⁻¹ Cu			mg L ⁻¹ Zn			mg L ⁻¹ B		
F.V.		F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F	
MAGN		1.55	0.3010		0.03	0.8780		2.36	0.2217		7.06	0.0766		2.05	0.2479	
CATION		6.78	0.0002		6.41	0.0004		2.16	0.0872		12.36	<0.0001		5.88	0.0007	
MAGN X CATION		1.89	0.1249		3.94	0.0076		1.91	0.1239		10.29	<0.0001		4.21	0.0051	
CV		9.49			10.09			14.95			11.98			9.68		
Magnetismo	M	313.20	ns		M	289.21	ns		M	60.65	ns		M	19.00	ns	
	NM	298.95	ns		NM	282.28	ns		NM	57.50	ns		NM	17.71	ns	
DMSH		36.38			41.08			11.27			1.52			58.84		
Relaciones Ca/Mg/K o niveles de calcio	S6	338.79	a		S1	312.79	a		S4	63.33	ns		S6	23.44	a	
	S4	325.84	a		S6	310.54	a		S1	65.04	ns		S5	18.56	b	
	S2	310.44	a		S4	293.98	ab		S3	59.51	ns		S3	18.00	b	
	S3	303.54	ab		S2	284.01	ab		S2	55.84	ns		S2	17.36	b	
	S1	296.38	ab		S3	256.73	b		S5	54.40	ns		S1	17.06	b	
	S5	261.45	b		S5	255.77	b		S6	52.93	ns		S4	16.39	b	
DMSH		44.16			44.47			13.80			3.45			88.76		
Contrastes				Pr > F			Pr > F			Pr > F			Pr > F			Pr > F
S1-NM vs S1-M	303.26	289.50	-	ns	285.08	340.50	+	0.0154	61.65	68.43	+	ns	18.38	15.75	-	0.0947
S2-NM vs S2-M	311.33	309.56	-	ns	284.63	256.09	-	0.2262	56.25	64.18	+	ns	12.33	19.73	+	0.0001
S3-NM vs S3-M	273.34	333.75	+	ns	259.69	253.76	-	0.7860	61.58	57.45	-	ns	15.38	20.63	+	0.0016
S4-NM vs S4-M	308.36	343.31	+	ns	301.43	286.54	-	0.4965	55.38	75.28	+	ns	14.55	18.23	+	0.0219
S5-NM vs S5-M	264.11	258.79	-	ns	231.11	280.43	+	0.0295	55.90	61.28	+	ns	21.68	15.45	-	0.0003
S6-NM vs S6-M	333.30	344.29	+	ns	331.73	289.35	-	0.0590	54.23	51.63	-	ns	23.99	24.23	+	0.9184

Nota: valores con la misma letra en la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha = 0.05$). DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; CV: Coeficiente de variación. ns: no significativo. S: Solución. NM: No magnetizado. M: Magnetizado. En los contrastes el signo (+) significa aumento y el signo (-) disminución.

Cuadro 3.3.7. Concentraciones de micronutrientes en fruto de plantas de arándano cv. Biloxi desarrolladas en seis soluciones nutritivas de distintas relaciones Ca/Mg/K con y sin tratamiento magnético.

		mg L ⁻¹ Fe			mg L ⁻¹ Mn			mg L ⁻¹ Cu			mg L ⁻¹ Zn			mg L ⁻¹ B		
F.V.	F	Pr > F			F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F	
MAGN	0.56	0.4945			1.65	0.2678		0.09	0.7801		1.25	0.3262		1.73	0.2589	
CATION	2.93	0.0248			3.99	0.0052		2.41	0.0538		3.19	0.0164		1.44	0.2329	
MAGN X CATION	9.86	<0.0001			1.88	0.1208		4.57	0.0022		13.75	<0.0001		5.50	0.0007	
CV	12.39				14.64				20.26				16.75			
Magnetismo	M	26.95	ns		M	24.81	ns		M	10.84	ns		M	3.08	ns	
	NM	25.43	ns		NM	21.98	ns		NM	10.49	ns		NM	2.85	ns	
DMSH	2.74				6.24				1.17				0.43			
Relaciones Ca/Mg/K o niveles de calcio	S2	28.00	a		S1	25.97	a		S5	12.71	ns		S5	3.63	a	
	S5	27.22	ab		S5	24.88	a		S6	11.85	ns		S6	3.13	ab	
	S3	27.03	ab		S6	24.54	ab		S1	10.50	ns		S2	2.91	b	
	S6	26.55	ab		S4	23.24	ab		S3	10.03	ns		S1	2.86	b	
	S1	25.29	ab		S3	21.95	ab		S2	9.81	ns		S4	2.66	b	
	S4	23.26	b		S2	19.94	b		S4	9.29	ns		S3	2.65	b	
DMSH	4.43				4.68				2.92				0.67			
Contrastes				Pr > F			Pr > F				Pr > F					Pr > F
S1-NM vs S1-M	24.67	25.90	+	0.5586	24.72	27.21	+	ns	12.00	8.99	-	0.0297	2.57	3.14	+	0.0820
S2-NM vs S2-M	22.46	33.53	+	<0.0001	19.29	20.59	+	ns	8.28	11.33	+	0.0277	2.43	3.39	+	0.0045
S3-NM vs S3-M	28.84	27.00	-	0.3646	20.97	22.93	+	ns	10.18	9.87	-	0.8179	2.61	2.68	+	0.8279
S4-NM vs S4-M	24.14	22.38	-	0.4036	19.34	25.39	+	ns	9.89	8.68	-	0.3709	2.52	2.79	+	0.4036
S5-NM vs S5-M	30.21	21.61	-	0.0006	20.89	27.86	+	ns	12.92	10.80	-	0.1687	4.47	2.32	-	<0.0001
S6-NM vs S6-M	24.36	28.74	+	0.0418	25.19	23.89	-	ns	9.67	14.03	+	0.0022	2.47	3.79	+	0.0002

Nota: valores con la misma letra en la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha = 0.05$). DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; CV: Coeficiente de variación. ns: no significativo. S: Solución. NM: No magnetizado. M: Magnetizado. En los contrastes el signo (+) significa aumento y el signo (-) disminución.

El amonio se vuelve importante en medios ácidos como los que se utilizan en arándano ya que este se absorbe más fácilmente que el Ca (Benton, 2012; Fageria, 2009). Castellanos *et al.* (2000) reportan antagonismos entre el Ca y el P, Fe, Zn y B a nivel del suelo y reacciones sobre la superficie de raíz. De acuerdo a Baset (2015) y Benton (2012) el calcio es uno de los mayores antagonistas del Fe, Mn, Cu, Zn y B. Se han encontrado interacciones altamente negativas entre el Ca y el P en cultivos de arroz en oxisoles (Fageria, 2009). Por el contrario de los nutrimentos anteriores, la concentración de Zn en raíz disminuyó de manera significativa conforme la dosis de calcio en las SN's fue menor, indicando un efecto sinérgico en este órgano de la planta. Este comportamiento ha sido informado por Benton (2012), quien menciona que el Zn es tanto antagonista como sinergista con el Ca. La dosis de calcio en la solución S5 generó disminuciones en las concentraciones Ca y Cu en la raíz, Fe y Mn en hoja, y el Ca en fruto; asimismo, aumentó la concentración de Mg en fruto. Esta afirmación, debe manejarse con cuidado ya que como se mencionó anteriormente estos efectos se vieron afectados con condiciones de estrés hídrico en este tratamiento en particular. Por otra parte, la solución nutritiva S3 generó bajos niveles de Mn y B en raíz, y Mn en hoja. Las concentraciones más altas de Mn en hoja se registraron en el nivel máximo y mínimo de calcio (S1 y S6) con valores de 310.54 y 312.79 mg·kg⁻¹, respectivamente. La solución nutritiva S6 produjo las concentraciones más bajas de Mn y Zn en raíz (246.30 mg·kg⁻¹ y 48.58 mg·kg⁻¹) y la más alta de Zn en hoja (23.44 mg·kg⁻¹).

Las respuestas al campo magnético según los Cuadros 3.3.2, 3.3.3, 3.3.4, 3.3.5, 3.3.6 y 3.3.7, fueron producto de efectos de interacción entre las soluciones nutritivas y el CM aplicado. Los resultados fueron variables entre los nutrimentos. Haciendo las comparaciones con los niveles de Ca respectivos, en las plantas tratadas con la solución S1 magnetizada (S1-M) se generaron aumentos significativos de N, Mg, Cu, Zn y B en raíz, Mn en hoja y B en fruto, así como disminuciones de N en hoja, Mn en raíz y Cu en fruto. En el tratamiento S2-M hubo incrementos significativos de Fe en raíz, Zn en hoja, Fe, Cu y Zn en fruto, y disminuciones de Mg, Mn y Zn en raíz, Ca y B en hoja, Ca en fruto. En la S3-M se encontraron aumentos de P, de Zn y B, en raíz y hoja respectivamente, y disminuciones en las concentraciones de Ca y Zn en raíz y Mg en hoja. En la S4-M se registraron altas concentraciones de Mn y B en raíz, Zn en hoja, N y P en fruto, y bajas concentraciones de Ca, Mg y Cu en raíz, Ca y B en hoja. La S5-M

incrementó significativamente los niveles de Mg, Mn y Zn en raíz, Mn en hoja y Ca en fruto, y disminuyó N, P, K, Fe y B en raíz, Mg y Zn en hoja, P, K, Mg, Fe, Zn y B en fruto. La S6-M presentó efectos significativos, aumentó P, Fe y B en raíz, P, K y Mg en hoja, N, P, K, Mg, Fe, Cu y Zn en fruto, pero disminuyó Mn y Cu en raíz, y Ca en fruto. Según estos resultados, se observa que la raíz fue el órgano que produjo las mayores respuestas al factor magnético, seguido del fruto y finalmente la hoja. Además, estos efectos se presentaron mayormente en los micronutrientes y en las SN's con concentraciones bajas de calcio (S4-M, S5-M y S6-M).

De acuerdo a lo descrito anteriormente, puede notarse que las respuestas nutrimentales del arándano al factor magnético son muy variables, por lo que no es posible establecer efectos específicos en las plantas de arándano. Sin embargo, existen cambios estadísticos significativos importantes en los diferentes órganos de la planta para cada nivel de calcio evaluado, los cuales, fueron tanto positivos como negativos. La diferencia en respuestas entre los niveles de calcio, que se establecieron a través de la relación Ca/Mg/K, indica que los efectos observados dependieron en gran medida de los balances químicos de cada solución. Además, la comparación de estos resultados con los que se han encontrado en otros trabajos como los de Hachicha *et al.* (2018), El Sayed y El Sayed (2014) y Grewal y Maheshwari (2011, 2009), sugiere que la respuesta de las plantas a un CM no solo depende de los balances químicos de las SN's sino también de la especie vegetal. Este hecho da algunos elementos para ayudar a comprender mejor el fenómeno magnético en las plantas.

3.3.3. Calidad y rendimiento del fruto

El Cuadro 3.3.8 muestra evidencia altamente significativa de que las variables de calidad del fruto evaluadas fueron distintas en cada muestreo realizado, siendo el pH y los SST los que tuvieron mayor variabilidad estadística. Esto indica que el estado de madurez del fruto es un factor importante que debe ser considerado cuando se evalúan parámetros de calidad como pH, CE, antocianinas y SST, por lo tanto, los muestreos en fruto deben efectuarse tomando otras consideraciones además del color de la superficie del fruto que debe ser 100% azul (Pino, 2007), que es la manera más fácil y práctica para determinar el momento del corte. Se puede utilizar como indicador el

contenido de SST, cuyo nivel óptimo debe ser superior a 11 °Brix (García y García, 2005).

Considerando las condiciones en las que se desarrollaron las unidades experimentales del tratamiento S5 descritas en el apartado anterior, la CE fue la variable que presentó el menor efecto por la variación en las concentraciones de calcio empleadas en las SN's (Cuadro 3.3.8). No se encontraron diferencias significativas importantes en pH entre las soluciones S2, S3, S4 y S6. En antocianinas, expresada como mg equivalentes de cianidin 3-glucósido por cada 100 g de peso fresco, los valores más altos se registraron en frutos bajo los tratamientos S1, S2 y S6, y los más bajos en S2 y S4 con valores de 305.0, 289.0, 288.8, 270.3 y 253.9, respectivamente. Beccaro *et al.*, (2006) reportan concentraciones de antocianinas que van de 30.0 a 231.0 mg·100·g⁻¹ p.f. para arándanos de arbustos altos.

El contenido de SST presentó una baja variación entre las soluciones S2, S3, S4 y S6. La solución S1 con la dosis máxima de calcio generó estadísticamente el pH más ácido en fruto (2.9), y aumentó la concentración de antocianinas (301.0 mg·100 g⁻¹ p.f.) y SST (12.6 °Bx). El nivel de calcio en S5, aumentó significativamente el pH y CE con valores de 3.2 y 0.97 dS·m⁻¹, respectivamente, y disminuyó la cantidad de SST en fruto (11.5 °Bx).

Según el Cuadro 3.3.8, la aplicación de CM's a las soluciones nutritivas aumentó significativamente el contenido de antocianinas en fruto, en un promedio de 14.1 mg. Esta respuesta se presentó en las plantas tratadas con las soluciones S2, S3, S4 y S5 magnetizadas. Se reportan aumentos significativos de pH en fruto en las soluciones S3-M y S6-M, e incrementos de CE y SST en la S2-M. Los frutos en los tratamientos S3-M y S6-M presentaron disminuciones en el contenido de SST. La solución S5-M disminuyó el pH y la CE, y aumentó SST en fruto.

Cuadro 3.3.8. Calidad del fruto en arándanos cv. Biloxi desarrollados en seis soluciones nutritivas de distintas relaciones Ca/Mg/K con y sin tratamiento magnético.

		pH [H]			CE (dS m ⁻¹)			Antocianinas (mg 100 g ⁻¹ p.f.)				SST (g sacarosa 100 mL ⁻¹)					
F.V.		F	Pr > F		F	Pr > F		F		Pr > F		F		Pr > F			
MUES		682.0	<0.0001		80.22	<0.0001		18.51		0.0002		30.70		<0.0001			
MAGN		2.87	0.1067		0.00	0.9705		39.97		<0.0001		0.15		0.7052			
CATION		17.86	<0.0001		12.68	<0.0001		16.32		<0.0001		20.41		<0.0001			
MUES X MAGN		1.08	0.3954		5.25	0.0051		5.83		0.0084		3.47		0.0169			
MUES X CATION		3.19	<0.0001		4.33	<0.0001		5.51		<0.0001		4.09		<0.0001			
MAGN X CATION		15.15	<0.0001		7.18	<0.0001		4.56		0.0007		10.21		<0.0001			
MUES X MAGN X CATION		2.73	0.0003		2.74	0.0002		4.62		<0.0001		4.13		<0.0001			
CV		3.48			7.49			8.61				3.96					
Muestreo	1	4.07	a		1	1.24	a					1	12.90	a			
	3	2.93	b		5	0.86	b		3	308.61	a	3	12.48	ab			
	2	2.89	b		3	0.81	b		4	279.53	b	2	12.35	b			
	5	2.65	c		4	0.81	b		1	264.02	b	5	11.97	bc			
	4	2.62	c		2	0.80	b		2	263.70	b	6	11.47	cd			
DMSH		0.10			0.09			23.53				0.52					
Magnetismo	M	3.03	ns		M	0.90	ns		M	287.46	a	NM	12.09	ns			
	NM	2.99	ns		NM	0.90	ns		NM	273.45	b	M	12.02	ns			
DMSH		0.03			0.03			4.92				0.12					
Relaciones Ca/Mg/K o niveles de calcio	S5	3.18	a		S5	0.97	a		S1	305.01	a	S1	12.58	a			
	S4	3.05	b		S4	0.93	b		S2	288.98	ab	S3	12.22	b			
	S3	3.03	bc		S1	0.90	bc		S6	288.78	ab	S2	11.99	bc			
	S2	2.98	cd		S6	0.90	bc		S5	276.56	bc	S6	11.99	bc			
	S6	2.97	d		S3	0.86	cd		S4	270.30	cd	S4	11.95	c			
	S1	2.90	e		S2	0.85	d		S3	253.92	d	S5	11.51	d			
DMSH		0.07			0.04			16.70				0.27					
Contrastes		Pr > F			Pr > F			Pr > F				Pr > F					
S1-NM vs S1-M		2.88	2.92	+	0.0601	0.90	0.90	-	0.9484	305.00	305.01	+	0.7588	12.66	12.76	+	0.4681
S2-NM vs S2-M		2.98	2.99	+	0.1981	0.82	0.88	+	0.0380	281.80	296.15	+	0.0241	11.89	12.36	+	0.0021
S3-NM vs S3-M		2.96	3.10	+	0.0021	0.85	0.87	+	0.9149	236.43	271.41	+	<0.0001	12.62	12.17	-	0.0002
S4-NM vs S4-M		3.02	3.09	+	0.4910	0.90	0.95	+	0.1690	265.04	276.22	+	0.0283	12.13	12.02	-	0.2464
S5-NM vs S5-M		3.34	3.04	-	< 0.0001	1.05	0.90	-	<0.0001	264.08	289.05	+	0.0018	11.56	11.97	+	0.0247
S6-NM vs S6-M		2.88	3.07	+	< 0.0001	0.88	0.92	+	0.0692	292.20	285.56	-	0.1175	12.49	11.92	-	<0.0001

Nota: valores con la misma letra en la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha = 0.05$). DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; CV: Coeficiente de variación. ns: no significativo.

S: Solución. NM: No magnetizado. M: Magnetizado. En los contrastes el signo (+) significa aumento y el signo (-) disminución.

Cuadro 3.3.9. Rendimiento en función del diámetro de fruto en plantas de arándano cv. Biloxi desarrolladas en seis soluciones nutritivas de distintas relaciones Ca/Mg/K con y sin tratamiento magnético.

		Clase A g pl ⁻¹ (>17mm)			Clase B g pl ⁻¹ (17-10 mm)			Clase C g pl ⁻¹ (<10 mm)		
F.V.		F	Pr > F		F	Pr > F		F	Pr > F	
MAGN		7.03	0.0453		0.38	0.5655		1.44	0.2834	
CATION		14.30	<0.0001		8.02	<0.0001		3.80	0.0055	
MAGN X CATION		12.77	<0.0001		8.97	<0.0001		5.96	0.0002	
CV		18.16			10.68			14.24		
Magnetismo	M	143.1	a		NM	1313.2	ns	NM	389.7	ns
	NM	125.4	b		M	1295.9	ns	M	377.5	ns
DMSH		16.4			95.8			44.4		
Relaciones Ca/Mg/K o niveles de calcio	S6	185.2	a		S6	1471.7	a	S4	403.5	ns
	S1	139.4	b		S3	1379.4	ab	S5	402.7	ns
	S2	131.6	bc		S4	1351.3	ab	S3	398.0	ns
	S4	125.2	bc		S2	1275.5	bc	S6	397.7	ns
	S3	116.8	bc		S1	1172.5	c	S1	355.9	ns
	S5	105.7	c		S5	1164.6	c	S2	344.8	ns
DMSH		29.8			169.9			66.6		
Contrastes		Pr > F				Pr > F				Pr > F
S1-NM vs S1-M		112.6	166.2	+	0.0004	1137.8	1207.1	+	0.3980	411.0 300.8 - 0.0014
S2-NM vs S2-M		134.1	129.1	-	0.7295	1505.8	1045.1	-	<0.0001	341.2 348.4 + 0.8263
S3-NM vs S3-M		111.8	121.8	+	0.4855	1281.1	1477.6	+	0.0192	355.9 440.1 + 0.0127
S4-NM vs S4-M		110.4	140.0	+	0.0427	1418.6	1283.9	-	0.1040	408.5 398.5 - 0.7618
S5-NM vs S5-M		69.4	150.0	+	<0.0001	1124.4	1263.5	+	0.1725	485.5 369.6 - 0.0029
S6-NM vs S6-M		218.7	151.7	-	<0.0001	1445.5	1498.0	+	0.5220	387.7 407.6 + 0.5445

Nota: valores con la misma letra en la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha = 0.05$). DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; CV: Coeficiente de variación. ns: no significativo. S: Solución. NM: No magnetizado. M: Magnetizado. En los contrastes el signo (+) significa aumento y el signo (-) disminución.

De acuerdo al Cuadro 3.3.9 los rendimientos promedio por diámetro de fruto en arándano fueron de 125.4, 1,304.6 y 383.6 g por planta para las clases A, B y C, respectivamente, cosechados en un ciclo aproximado de un año. La mayor ganancia en rendimiento de fruto se registró en la clase A y B, con 185.2 y 1471.7 g·pl⁻¹, respectivamente, en la solución nutritiva (S6) con el nivel mínimo de calcio.

Es posible que este incremento en producción por efecto de la S6 se deba a una disminución de las interacciones negativas que tiene el Ca con los demás nutrientes en el medio de crecimiento (Baset, 2015), las cuales son más evidentes en los arándanos al ser plantas calcífugas (Retamalae y Hancock, 2018; Korcack, 1988). Krewer y NeSmith (1999) mencionan que, en presencia de altos niveles de Ca, los arándanos no pueden regular la entrada del nutriente a los tejidos lo que provoca una

acumulación excesiva reduciendo la absorción de Fe por las raíces e interfiriendo con el metabolismo de Mg y K en las plantas. Según Franceschi y Nakata (2005) el calcio excesivo es secuestrado y absorbido para formar oxalatos de calcio, los cuales, se depositan en las vacuolas de células especializadas.

Los aumentos significativos en rendimiento de frutos de clase B también se presentaron en las soluciones S3 y S4 con dosis bajas en calcio, lo que contrasta con las soluciones S1 y S2 que tenían las dosis más altas de Ca, en las cuales se encontraron los rendimientos más bajos de frutos clase B. No se encontraron diferencias significativas en la producción de frutos clase C en los arándanos ni entre los niveles de calcio S1, S2, S3 y S4 en producción de frutos clase A. Por otro lado, en el nivel S5 se encontraron los menores rendimientos para las categorías A y B, 105.7 y 1164.6 g·pl⁻¹, respectivamente.

En lo que respecta al factor magnético, este produjo aumentos estadísticamente significativos en la producción de frutos de clase A en las soluciones S1-M, S4-M y S5-M, contrario a la S6-M donde se encontró la producción más baja de frutos clase A. También se registraron disminuciones significativas de frutos clase B y clase C para las soluciones S2-M y, S1-M y S5-M, respectivamente. En la solución S3-M se produjeron incrementos significativos en frutos de clase B y C.

Aumentos en rendimiento por el uso de CM's en agua y soluciones nutritivas se han reportado en papa (Hachicha *et al.*, 2018), berenjena (Surendran *et al.*, 2016), nabo (Haq *et al.*, 2016), jitomate (Selim y El-Nady, 2011), chícharo y apio (Maheshwari y Grewal; 2011, 2009).

3.4. Conclusiones

Las concentraciones de calcio presentes en el medio de crecimiento, en el intervalo de 1.16-2.70 meq·L⁻¹, no afectaron significativamente el contenido de clorofilas a, b y totales, así como de carotenoides en arándano cv. Biloxi.

Los gradientes de concentración nutrimental en raíz, hoja y fruto en arándano cv Biloxi fueron $N > K > P \approx Ca > Mg > Mn > Fe > B > Zn > Cu$; $N > K > Ca > P \approx Mg > B > Fe \approx Mn > Cu > Zn$; y $K > N > Ca > P \approx Mg > B > Fe \approx Mn > Cu > Zn$, respectivamente.

En arándano cv. Biloxi niveles bajos de calcio (1.16-1.54 meq·L⁻¹) en las soluciones nutritivas aumentaron significativamente las concentraciones de N, K y B en hoja y de P en fruto, y disminuyeron el contenido de Zn en raíz.

Concentraciones altas de calcio en la solución nutritiva (2.70-3.08 meq·L⁻¹) incrementaron el nivel de acidez, antocianinas y sólidos solubles totales en fruto de arándano cv. Biloxi.

Las concentraciones más bajas de calcio (1.16-1.93 meq·L⁻¹) en las soluciones nutritivas tuvieron un impacto positivo en el rendimiento de fruto de arándano cv. Biloxi.

Los efectos producidos en arándano cv. Biloxi por el uso de soluciones nutritivas magnetizadas fueron distintos en cada nivel de calcio evaluado, siendo significativos en todas las variables; sin embargo, no es posible precisar efectos particulares que se puedan generalizar, ya que se observó una gran variabilidad de respuestas en los diferentes tejidos de la planta.

3.5. Literatura citada

- Aung, T., Muramatsu, Y., Horiuchi, N., Che, J., Mochizuki, Y. & Ogiwara, I. (2014). Plant growth and fruit quality of blueberry in a controlled room under artificial light. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 83:273-281.
- Austin, M. E. & Gaines, T. P. (1984). An observation of nutrient levels in old, unfertilized rabbiteye blueberry plants. *Horticultural Science*, 19:417-418.
- Ázcon B., J. & Talón, M. (2013). *Fundamentos de fisiología vegetal*. 2da ed. México. McGraw-Hill Interamericana. 651 pp.
- Barber, S. A. (1995). *Soil nutrient bioavailability; a mechanistic approach*. 2nd ed. USA. John Wiley & Sons. 414 pp.
- Baset M., M. A. (2015). *Nutrition of crop plants*. USA. Nova Science Publishers. 187 pp.
- Beccaro, G., Mellano, M. G., Botta, R., Chiabrando, V. & Bounous G. (2006). Phenolic and anthocyanin content and antioxidant activity in fruits of bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.) and of highbush blueberry (*V. corymbosum* L.) cultivars in North Western Italy. *Acta Horticulturae*, 715:553-557.
- Benton, J. J. (2001). *Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis*. USA. CRC Press. 363 pp.
- Benton J., J. (2012). *Plant nutrition and soil fertility manual*. 2nd ed. USA. CRC. Press. 273 pp.
- Castellanos, J. Z., Uvalle B., J. X. & Aguilar S., A. (2000). Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. 2da ed. México. Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola. 226 pp.
- Coey J., M. D. (2012). Magnetic water treatment - how might it work?. *Philosophical Magazine*, 92:3857-3865.
- Defilippi, B., Robledo & P., Becerra C. (2013). *Manejo de cosecha y poscosecha en arándano (107-115)*. En: Manual del arándano. Undurraga, P. y Vargas, S. (eds.). Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA.
- El Sayed, H. & El Sayed, A. (2014). Impact of magnetic water irrigation for improve the growth, chemical composition and yield production of broad bean (*Vicia faba* L.) plant. *Nature and Science*, 13:107-119.
- Fageria, N. K. (2009). *The use of nutrients in crop plants*. USA. CRC Press. 430 pp.

- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura, FIRA. (2016). *Panorama agroalimentario: Berries 2016*. México. Dirección de Investigación y Evaluación Económica Sectorial, FIRA. 41 pp.
- Forney, C. F., Mattheis, J. P. & Baldwin, A. E. (2009). *Effects on flavor* (pp. 119-158). In: Yahia, E. M., Modified and controlled atmospheres for the storage, transportation, and packaging of horticultural commodities. USA. CRC Press.
- Franceschi, V. R. & Nakata, P. A. (2005) Calcium oxalate in plants: formation and function. *Annual Review of Plant Biology*, 56:41-71.
- García R., J. C. & García G. De L., G. (2005). *Guía de cultivo: orientaciones para el cultivo del arándano*. España. Servicio de Investigación y Desarrollo Agroalimentario. 32 pp.
- Giusti, M. M. and Wrolstad, R. E. (2001). *Characterization and measurement of anthocyanins by UV-Visible spectroscopy* (pp. 19-32). Handbook of food analytical chemistry. Vol. 2. USA: John Wiley & Sons.
- Grewal, H. S. & Maheswari, B. L. (2009). Magnetic treatment of irrigation water: Its effects on vegetable crop yield and water productivity. *Agricultural Water Management*, 96:1229-1236.
- Grewal, H. S. & Maheshwari, B. L. (2011). Magnetic treatment of irrigation water and snow pea and chickpea seeds enhances early growth and nutrient contents of seedlings. *Bioelectromagnetics*, 32:58-65.
- Hachicha, M., Kahlaoui, B., Khamassi N., Misle E. & Jouzdan, O. (2018). Effect of electromagnetic treatment of saline water on soil and crops. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17:154-162.
- Hanson, E. J. & Hancock, J. F. (1996). *Managing the nutrition of highbush blueberries*. USA. Michigan State University Extension. Bulletin E-2011. 6 pp.
- Haq, Z., Iqbal, M., Jamil, Y., Anwar, H., Younis, A., Arif, M., M. Zeshan, F. & Hussain F. (2016). Magnetically treated water irrigation effect on turnip seed germination, seedling growth and enzymatic activities. *Information Processing In Agriculture*, 3:99-106.
- Jackson, M. L. (1964). *Análisis químico de suelos*. 2da ed. España. Omega. 662 pp.
- Korcak, R. F. (1988) *Nutrition of blueberry and other calcifuges* (pp. 183-227). In: Janick J. (ed.), Horticultural Reviews Vol. 10. USA. Timber Press.

- Krewer, G. and NeSmith, D. S. (1999). *Blueberry fertilization in soil*. USA. University of Georgia Ext. Fruit Publication 01-1. 12 pp.
- Lee, J, A, (1999). The calcicole-calcifuge problem revisited. *Advances in Botanical Research*, 29:1-30.
- Marschner, P. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. 3rd edition. USA. Elsevier, Academic Press. 651 pp.
- Moggia, C. (1991). *Aspectos de cosecha y postcosecha de arándanos (pp. 80-92)*. En: Retamales, J., Moggia, C., Lolas, M. y Román, H. (eds.), Seminario Internacional: Arándano - producción comercial y perspectivas económicas. Chile. Universidad de Talca.
- Mostafazadeh F., B., Khoshravesh, M., Mousavi, S. F. & Kiani, A. R. (2011). Effects of magnetized water and irrigation water salinity on soil moisture distribution in trickle irrigation. Technical Note. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 137:398-402.
- Moussa, H. R. (2011). The impact of magnetic water application for improving common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) production. *New York Science Journal*, 4(6).
- Navarro B., S. & Navarro G., G. (2003). *Química agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal*. 2da ed. España. Mundi-Prensa. 487 pp.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO. (2019). *Estadísticas, FAOSTAT*. Disponible en <http://www.fao.org/faostat/es/#data>
- Pietruszewski, S. & Kania, K. (2010). Effect of magnetic field on germination and yield of wheat. *International Agrophysics*, 24:297-302.
- Pineda P. J., Avitia G. E., Castillo G. A. M., Corona T. T., Valdez A. L. A. & Gómez H. J. (2008). Extracción de macronutrientes en frambueso rojo. *Terra Latinoamerica*, 26:333-340.
- Pino P., C. M. (2007). *Descripción del desarrollo vegetativo y de las características físicas y químicas de los frutos de cuatro clones de arándano alto (Vaccinium corymbosum L.)*. [Tesis de Licenciatura. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. 74 pp.]
- Retamales, J. B. & Hancock, J. F. (2018). *Blueberries*. 2nd Edition. Crop production science in horticulture series. USA. CABI. 411 pp.

- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000*. México. SEMARNAT. 73 pp.
- Selim, A-F. H. & El-Nady, M. F. (2011). Physio-anatomical responses of drought stressed tomato plants to magnetic field. *Acta Astronautica*, 69:387-396.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SIAP. (2019). *Panorama agroalimentario 2019 (pp. 32-33)*. México. SAGARPA.
- Shen, R. F., Chen, R. F. & Ma, J. F. (2006). Buckwheat accumulates aluminum in leaves but not in seeds. *Plant and Soil*. 284:265–271.
- Steiner, A. A. (1980). The selective capacity of plants for ions and its importance for the composition and treatment of the nutrient solution. *Acta Horticulturae*, 98:87-97.
- Steiner, A. A. (1984). *The universal nutrient solution (pp. 633-650)*. Proceedings of IWOSC 1984. The Netherlands. 6th International Congress on Soilless Culture.
- Surendran, U., Sandeep, O. & E. J., J. (2016). The impacts of magnetic treatment of irrigation water on plant, water and soil characteristics. *Agricultural Water Management*, 178:21-29.
- Ueno, S. & Iwasaka, M. (1994a). Parting of water by magnetic fields. *IEEE Transactions on Magnetics*, 30:4698-4700.
- Ueno, S. & Iwasaka, M. (1994b). Properties of diamagnetic fluid in high gradient magnetic fields. *Journal of Applied Physics*, 75:7177-7179.
- Wellburn, A. R. (1994). The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *Journal Plant Physiology*, 144:307-313.
- Witham, F. H., Blaydes, D. F. & Devlin, R. M. (1971). *Experiments in plant physiology*. USA. Van Nostrand Reinhold Company. 245 pp.
- Wright, G. C., Patten, K. D. & Drew, M. C. (1993). Gas exchange and chlorophyll content of 'tifblue' rabbiteye and 'sharpblue' southern highbush blueberry exposed to salinity and supplemental calcium. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 118:456-463.
- Zhao, X. Q., Chen, R. F. & Shen, R. F. (2014). Coadaptation of plants to multiple stresses in acidic soils. Technical note. *Soil Science*, 179:503-513.