



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS PUEBLA

**POSTGRADO EN ESTRATEGIAS PARA EL DESARROLLO AGRÍCOLA
REGIONAL**

**EPT EN AGUA RESIDUAL DE RIEGO, SUELO
Y NOPAL VERDURA E INOCULACIÓN DE
BPCV Y PERCEPCIÓN DE LOS
PRODUCTORES POR SU USO EN LA
AGRICULTURA**

VICTORIA TÉLLEZ PÉREZ

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE**

DOCTORA EN CIENCIAS

PUEBLA, PUEBLA

2022



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

La presente tesis, titulada: **EPT en agua residual de riego, suelo y nopal verdura e inoculación de BPCV y percepción de los productores por su uso en la agricultura**, realizada por la alumna: **Victoria Téllez Pérez**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

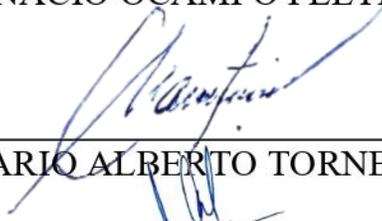
DOCTORA EN CIENCIAS
ESTRATEGIAS PARA EL DESARROLLO AGRÍCOLA REGIONAL

CONSEJO PARTICULAR

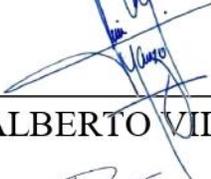
CONSEJERO:


DR. IGNACIO OCAMPO FLETES

ASESOR:


DR. MARIO ALBERTO TORNERO CAMPANTE

ASESOR:


DR. LUIS ALBERTO VILLARREAL MANZO

ASESOR:


DR. PEDRO ANTONIO LÓPEZ

ASESOR:


DR. JOSÉ CARLOS MENDOZA HERNÁNDEZ

Puebla, Puebla, México, agosto del 2022.

EPT EN AGUA RESIDUAL DE RIEGO, SUELO Y NOPAL VERDURA E INOCULACIÓN DE BPCV Y PERCEPCIÓN DE LOS PRODUCTORES POR SU USO EN LA AGRICULTURA

Victoria Téllez Pérez, D. C.

Colegio de Postgraduados, 2022

RESUMEN

La inversión en el desarrollo industrial con falta de regulación, en cuanto a la emisión de sus contaminantes, ha traído consigo la contaminación de los cuerpos hídricos. Esto se ha extrapolado al rubro agrícola, donde diversos contaminantes han llegado a la cadena trófica. Por ello, se planteó como objetivo evaluar la calidad del agua, el suelo y el material vegetal de nopal verdura *Opuntia ficus-indica* cultivar Atlixco con y sin Bacterias Promotoras de Crecimiento Vegetal (BPCV), en parcelas irrigadas con aguas residuales no tratadas provenientes del río Atoyac, que contienen elementos potencialmente tóxicos (EPT), y conocer la percepción de los productores ante el riesgo al manejar esta agua para la producción agrícola, en localidades de los municipios de Atlixco y Santa Isabel Cholula. Se aplicó una encuesta para conocer la percepción del riesgo de los productores ante la contaminación del agua de riego. Se muestreó y analizó agua, suelo y material vegetal de nopal verdura inoculado con BPCV conforme a la normatividad mexicana vigente y se compararon las concentraciones de EPT, con los límites permisibles de normas nacionales e internacionales. Los productores perciben remoto el riesgo de enfermarse por el uso agrícola de las aguas provenientes del río Atoyac en la zona de riego. Sin embargo, aunque el agua residual de riego y suelo evaluado no rebasa los límites máximos permisibles de EPT conforme a la normatividad mexicana vigente, sí rebasa límites permisibles de las normatividades canadiense, española y de la Comunidad Europea. En este sentido, se propone la inoculación en nopal verdura de la BPCV *Serratia* K120, para usar el nopal cosechado con fines alimentarios y la BPCV *Escherichia coli* N16 con fines de biorremediación, ya que la primera disminuye la concentración de Pb y la segunda la aumenta en el tejido vegetal.

Palabras clave: calidad del agua residual de riego, calidad del suelo, calidad del material vegetal, elementos potencialmente tóxicos, percepción del riesgo, nopal verdura.

PTE IN IRRIGATION WASTEWATER, SOIL AND NOPAL AND INOCULATION OF PGPB AND PERCEPTION OF PRODUCERS FOR THEIR USE IN AGRICULTURE

Victoria Téllez Pérez, D. C.

Colegio de Postgraduados, 2022

ABSTRACT

Investment in industrial development with a lack of regulation, regarding the emission of its pollutants, has led to the contamination of water bodies. This has been extrapolated to the agricultural sector, where various pollutants have reached the food chain. Therefore, it was proposed as an objective to evaluate the quality of water, soil and plant material of nopal vegetable *Opuntia ficus-indica* cultivar Atlixco with and without Plant Growth Promoting Bacteria (PGPB), in irrigated plots with untreated wastewater from the Atoyac River, that contains potentially toxic elements (PTE), and to know the perception of producers before the risk when managing this water for agricultural production, in localities of the municipalities of Atlixco and Santa Isabel Cholula. A survey was applied to know the perception of the risk of the producers before the contamination of the irrigation water. Water, soil, and plant material of nopal vegetable inoculated with PGPB were sampled and analyzed in accordance with current Mexican regulations and PTE concentrations, were compared with the permissible limits of national and international standards. Producers perceive remotely the risk of getting sick from the agricultural use of the waters from the Atoyac River in the irrigation area. However, although the irrigation wastewater and soil evaluated does not exceed the maximum permissible limits of PTE according to current Mexican regulations, it does exceed permissible limits of Canadian, Spanish and European Community regulations. In this sense, it is proposed the inoculation in nopal vegetable of the PGPB *Serratia* K120, to use the nopal harvested for food purposes and the PGPB *Escherichia coli* N16 for bio-remediation purposes, since the first decreases the concentration of Pb and the second increases it in the plant tissue.

Keywords: irrigation wastewater quality, soil quality, quality of plant material, potentially toxic elements, risk perception, nopal vegetable.

AGRADECIMIENTOS

"La gratitud no es sólo la mayor de las virtudes, sino la madre de todas las demás". Cicerón

Al Colegio de Postgraduados *Campus* Puebla, por darme la oportunidad de formarme académicamente.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico otorgado durante mis estudios de doctorado.

A mi amado esposo, Josué, por todo su amor, apoyo, tiempo, risas y desvelos, por acompañarme en este intrincado camino de la elaboración de tesis. A mi amado hijo, Lázaro Abel, por brindarme su sempiterno amor desde su concepción, gracias por ser una fuente sin fin de alegrías, diversiones y júbilos. A mis padres, Victoriano Téllez Pérez y María Antonia del Carmen Pérez Luna, por haberme enseñado que con esfuerzo y constancia todo se consigue. A mi hermana Carmen Téllez Pérez, quien me ha mostrado que la familia siempre estará ahí.

A mi consejero, Dr. Ignacio Ocampo Fletes, por el tiempo y paciencia para la realización de este trabajo. A mis asesores, Dr. Mario Alberto Tornero Campante, Dr. Luis Alberto Villarreal Manzo, Dr. Pedro Antonio López y Dr. José Carlos Mendoza Hernández, así como a la Dra. María de Lourdes Hernández Rodríguez y al Dr. Javier Cruz Hernández, sinodales, quienes han enriquecido este trabajo a través de sus valiosas aportaciones y observaciones.

A todos mis compañeros del posgrado, en especial a Ana García, Yajaira Díaz, Julio César Flores y Juan López. A los productores e informantes que colaboraron durante este proceso de investigación, en especial a Elia, Petra, Candelario, Tomas y Rodrigo. A todos los amigos que me ayudaron durante la investigación en especial a Yolanda Alvarado Barceinas, Yolanda Paola Silva Uribe, Fabiola Tepox, Brígida Martínez, Teresa Martínez, Juan Reyes Flores y Moisés Ernesto Sánchez Castro.

A la Mtra. Nohemí Bonilla del Laboratorio de Agua, A Karen, Lucero y Rosario del Laboratorio de Microbiología, a César Calderón del Laboratorio de Suelos y al Dr. Dionicio Juárez Ramón por brindar apoyo en las instalaciones de la Maestría en Manejo Sostenible de Agroecosistemas de la BUAP. A todos, gracias.

DEDICATORIA

A la Virgen del Carmen.

A mi amada familia.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT.....	iv
AGRADECIMIENTOS	v
DEDICATORIA	vi
LISTA DE CUADROS.....	xii
LISTA DE CUADROS ANEXO B	xv
LISTA DE CUADROS ANEXO C	xv
LISTA DE CUADROS ANEXO D.....	xvii
LISTA DE FIGURAS.....	xviii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Problema de investigación	5
II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	9
2.1 Objetivos.....	9
2.1.1 Objetivo general.....	9
2.1.2 Objetivos específicos	9
2.2 Hipótesis	9
2.2.1 Hipótesis general.....	9
2.2.2 Hipótesis específicas.....	10
III. REVISIÓN DE LITERATURA	11
3.1 Percepción del riesgo	11

3.2	Enfoques ecosistémicos	12
3.3	El agroecosistema como unidad de análisis.....	14
3.4	Efectos a la salud por exposición a Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT).....	14
3.4.1	Cadmio.....	14
3.4.2	Arsénico	15
3.4.3	Plomo	15
3.4.4	Cobre.....	15
3.4.5	Mercurio.....	15
3.5	Nopal verdura (<i>Opuntia ficus-indica</i>).....	16
3.6	Biorremediación	18
3.6.1	Biodiversidad microbiana, contaminación de suelo y cultivos agrícolas	18
3.6.2	Procesos de bioaumentación en el desarrollo agrícola	21
3.6.3	Suelo agrícola irrigado con aguas residuales	22
3.6.4	Homeostasis en la relación microorganismo-ambiente	24
3.7	Calidad de suelo, agua y materia vegetal del agroecosistema	26
3.7.1	Agua.....	26
3.7.1.1	Variables evaluables en el análisis de agua	26
3.7.1.2	Normatividad mexicana de EPT en aguas residuales	27
3.7.1.3	Normatividad internacional de EPT en aguas residuales	28
3.7.2	Suelo	31
3.7.2.1	Variables evaluables en el análisis de suelo	31

3.7.2.2	Normatividad mexicana de EPT en Suelo	32
3.7.2.3	Normatividad Internacional de EPT en Suelo	33
3.7.3	Material vegetal	34
3.7.3.1	Variables evaluables en el análisis de material vegetal	34
3.7.3.2	Normatividad internacional de EPT en material vegetal	35
IV.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	36
4.1	Características de la zona de estudio	36
4.2	La agricultura de la zona de estudio	38
4.3	Técnicas de investigación.....	39
4.3.1	La encuesta.....	39
4.3.2	Diseño experimental y cultivo de nopal en campo	40
4.3.3	Diseño experimental y cultivo de nopal en invernadero.....	42
4.3.4	Análisis en laboratorio	45
4.3.4.1	Cultivo de BPCV	45
4.3.4.2	Muestreo y análisis de agua.....	45
4.3.4.3	Muestreo y análisis de suelo.....	47
4.3.4.4	Muestreo del material vegetal.....	49
4.4	Técnicas para el análisis de la información	50
4.4.1	Datos de la encuesta.....	50
4.4.2	Datos del material vegetal.....	50
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	51

5.1	Aspectos sociodemográficos	51
5.2	Percepción de problemas en la zona de riego	54
5.3	Percepción del riesgo	57
5.3.1	Afectación del agua residual al suelo.....	61
5.3.2	Afectación del agua residual al nopal	63
5.3.3	Afectación del agua residual a otros cultivos	65
5.3.4	Afectación del agua residual a la salud de los productores	66
5.3.5	Afectación del agua residual a los animales	81
5.3.6	Opinión de los productores sobre el cultivo de nopal.....	82
5.4	Experiencia agrícola	83
5.5	Manejo agronómico del nopal	83
5.5.1	Preparación del suelo	83
5.5.2	Plantación de nopal	83
5.5.3	Fertilización	83
5.5.4	Abonos orgánicos.....	84
5.5.5	Control de malezas.....	84
5.5.6	Control de plagas	84
5.5.7	Control de enfermedades	84
5.5.8	Adherente	84
5.5.9	Poda y sanidad	84
5.5.10	Riegos.....	84

5.5.11	Cosecha del nopal.....	85
5.5.12	Mercado.....	85
5.6	Elementos potencialmente tóxicos en el agua de uso agrícola.....	85
5.7	Elementos potencialmente tóxicos en suelos agrícolas.....	92
5.8	Efecto de las BPCV en el desarrollo del nopal.....	96
5.9	Biosorción de EPT en Opuntia ficus-indica cultivar Atlixco.....	96
VI.	CONCLUSIONES.....	99
VII.	LITERATURA CITADA.....	101
ANEXO A.	CUESTIONARIO.....	117
ANEXO B.	ANOVA EFECTO TRATAMIENTOS EN NÚMERO DE CLADODIOS ...	130
ANEXO C.	ANOVA EFECTO TRATAMIENTOS EN GROSOR DE CLADODIOS	133
ANEXO D.	ANOVA EFECTO TRATAMIENTOS EN ELEMENTOS.....	144

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Límites fitotóxicos de ciertos elementos traza en aguas de riego (ppm).	26
Cuadro 2. Límites Permisibles para Metales y Cianuros.....	27
Cuadro 3. Recomendaciones de EPT para descargas de aguas residuales de instalaciones federales.	28
Cuadro 4. Clases de calidad de las aguas regeneradas y uso agrícola y método de riego permitidos.....	29
Cuadro 5. Normas de Calidad Ambiental para EPT en agua de la Comunidad Europea.	31
Cuadro 6. Concentraciones máximas tolerables en suelo de EPT.....	32
Cuadro 7. Concentraciones de referencia totales (CRT) por tipo de uso de suelo.	33
Cuadro 8. Límites permisibles de EPT en suelos agrícolas de Ecuador, Canadá y la Comunidad Europea.....	34
Cuadro 9. Contenido máximo de EPT en vegetales en la Unión Europea.	35
Cuadro 10. Producción de nopal por municipios del estado de Puebla a cielo abierto y de riego.	38
Cuadro 11. Coordenadas geográficas de las estaciones de muestreo de agua.	46
Cuadro 12. Parámetros de análisis de las muestras de agua de riego.	46
Cuadro 13. Coordenadas geográficas de las estaciones de muestreo de suelo.	48
Cuadro 14. Parámetros para determinar la calidad del suelo.....	49
Cuadro 15. Estructura por edad y sexo de los productores de nopal en la zona de estudio.....	51
Cuadro 16. Datos descriptivos sociodemográficos.....	52
Cuadro 17. Percepción del nivel de gravedad de problemáticas.	55

Cuadro 18. Análisis de la relación entre antigüedad y percepción sobre la afectación a la salud por contaminación del agua de riego.	59
Cuadro 19. Análisis de la relación entre percepción sobre el grado contaminación cerca de la Central Hidroeléctrica Portezuelo I y de la contaminación por olor indeseable.	61
Cuadro 20. Análisis de la relación entre sexo y percepción sobre la afectación a la salud por contaminación del agua de riego.	68
Cuadro 21. Análisis de la relación entre escolaridad y percepción sobre la afectación a la salud por contaminación del agua de riego.	69
Cuadro 22. Análisis de la relación entre antigüedad y percepción sobre la afectación a la salud por contaminación del agua de riego.	70
Cuadro 23. Análisis de la relación entre percepción sobre el grado contaminación cerca de la parcela del productor y de la afectación al sistema inmune humano.	71
Cuadro 24. Análisis de la relación entre el grado de temor de los productores ante el riesgo de enfermarse por la contaminación de los canales de riego y su sexo.	74
Cuadro 25. Análisis de la relación entre la percepción del riesgo de una amenaza para las generaciones futuras y la percepción de contaminación cerca de la Central Hidroeléctrica Portezuelo I.	75
Cuadro 26. Análisis de la relación entre la percepción del riesgo de una amenaza para las generaciones futuras y la percepción de contaminación cerca de la parcela del productor.	75
Cuadro 27. Análisis de la relación entre la posibilidad de afectación por contaminación del agua de riego y su escolaridad.	76
Cuadro 28. Análisis de la relación entre la posibilidad de afectación por contaminación del agua de riego y la percepción del grado contaminación cerca de Jagüey.	76

Cuadro 29. Análisis de la relación entre la posibilidad de afectación futura por contaminación del agua de riego y su escolaridad.	78
Cuadro 30. Análisis de la relación entre la posibilidad de afectación futura por contaminación del agua de riego y la percepción sobre el grado contaminación cerca de la Central Hidroeléctrica Portezuelo I.	78
Cuadro 31. Análisis de la relación entre la posibilidad de afectación futura por contaminación del agua de riego y la percepción sobre el grado contaminación cerca del Jagüey.	78
Cuadro 32. Análisis de la relación entre la posibilidad de afectación futura por contaminación del agua de riego y la percepción sobre el grado contaminación cerca de la parcela del productor.....	79
Cuadro 33. Análisis de la relación entre la percepción sobre las catástrofes para la población por contaminación del agua de riego y la percepción sobre el grado contaminación cerca del Jagüey.....	79
Cuadro 34. Estadísticas univariadas de las 18 características del modelo del "paradigma psicométrico".	81
Cuadro 35. Características físicas, químicas y biológicas del agua de riego en época de lluvia.....	87
Cuadro 36. Concentración de EPT en el agua de riego en época de lluvia comparado con los límites permisibles de la normatividad mexicana, canadiense y española.	89
Cuadro 37. Características físicas, químicas y biológicas del agua de riego en época de estiaje.	90
Cuadro 38. Concentración de EPT en el agua de riego en época de estiaje comparado con los límites permisibles de la normatividad mexicana, canadiense y española.	91
Cuadro 39. Características físicas y químicas del suelo en parcelas 1 y 2 de la zona de estudio.	92

Cuadro 40. Características físicas y químicas del suelo en parcelas 3 y 4 de la zona de estudio.	93
Cuadro 41. Características físicas y químicas del sustrato empleado para la siembra de nopal en invernadero.	94
Cuadro 42. Concentración de EPT en el suelo comparado con los límites permisibles de la normatividad mexicana, canadiense y de la Comunidad Europea.	95
Cuadro 43. Efecto de los tratamientos en el grosor del cladodio madre de nopal verdura.	96
Cuadro 44. Efecto de los tratamientos en concentración de Pb de nopal a cielo abierto inoculado con BPCV.	97
Cuadro 45. Efecto de los tratamientos en concentración de Zn de nopal a cielo abierto inoculado con BPCV.	97
Cuadro 46. Elementos en nopal inoculado con BPCV sembrado en sustrato con plomo en invernadero.	98

LISTA DE CUADROS ANEXO B

Cuadro B1. Efecto de los tratamientos en número de hijas de nopal verdura.	130
Cuadro B2. Efecto de los tratamientos en número de nietas de nopal verdura.	130
Cuadro B3. Efecto de los tratamientos en el número de brotes de nopal verdura.	131
Cuadro B4. Efecto de los tratamientos en el número de brotes hijas de nopal verdura.	131
Cuadro B5. Efecto de los tratamientos en el número de brotes nietas de nopal verdura.	132
Cuadro B6. Efecto de los tratamientos en el número de brotes bisnietas de nopal verdura. ..	132

LISTA DE CUADROS ANEXO C

Cuadro C1. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta hija uno de nopal verdura. ...	133
Cuadro C2. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta hija dos de nopal verdura.	133

Cuadro C3. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta hija tres de nopal verdura. ...	134
Cuadro C4. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta hija cuatro de nopal verdura.	134
Cuadro C5. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta hija cinco de nopal verdura.	135
Cuadro C6. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta hija seis de nopal verdura. ...	135
Cuadro C7. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta hija siete de nopal verdura...	136
Cuadro C8. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta nieta uno de nopal verdura. .	136
Cuadro C9. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta nieta dos de nopal verdura...	137
Cuadro C10. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta nieta tres de nopal verdura.	137
Cuadro C11. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta nieta cuatro de nopal verdura.	138
Cuadro C12. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta nieta cinco de nopal verdura.	138
Cuadro C13. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta nieta seis de nopal verdura.	139
Cuadro C14. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta nieta siete de nopal verdura.	139
Cuadro C15. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta nieta ocho de nopal verdura.	140
Cuadro C16. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta hija nieta nueve de nopal verdura.	140
Cuadro C17. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta nieta 10 de nopal verdura. .	141
Cuadro C18. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta nieta 11 de nopal verdura. .	141
Cuadro C19. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta nieta 12 de nopal verdura. .	142
Cuadro C20. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta nieta 13 de nopal verdura. .	142

Cuadro C21. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta nieta 14 de nopal verdura. .143

Cuadro C22. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta hija 15 de nopal verdura. ...143

LISTA DE CUADROS ANEXO D

Cuadro D1. Efecto de los tratamientos en concentración de Na de nopal a cielo abierto
inoculado con BPCV.....144

Cuadro D2. Efecto de los tratamientos en concentración de K de nopal a cielo abierto
inoculado con BPCV.....144

Cuadro D3. Efecto de los tratamientos en concentración de Fe de nopal a cielo abierto
inoculado con BPCV.....145

Cuadro D4. Efecto de los tratamientos en concentración de Cu de nopal a cielo abierto
inoculado con BPCV.....145

Cuadro D5. Efecto de los tratamientos en concentración de Mn de nopal a cielo abierto
inoculado con BPCV.....146

Cuadro D6. Efecto de los tratamientos en concentración de Ca de nopal a cielo abierto
inoculado con BPCV.....146

Cuadro D7. Efecto de los tratamientos en concentración de Mg de nopal a cielo abierto
inoculado con BPCV.....147

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio.....	37
Figura 2. Representación de una unidad experimental.	40
Figura 3. Croquis Bloques Completos al Azar Parcela 1 “Estacas”.....	41
Figura 4. Croquis Bloques Completos al Azar Parcela 2 “Terciopelo”.....	41
Figura 5. Aplicación de cepas de BPCV en las parcelas experimentales.	42
Figura 6. Cladodio para siembra en invernadero.	43
Figura 7. Suelo colectado en la localidad de San Pablo Ahuatempan.	43
Figura 8. Suelo cernido (a). Nitrato de plomo (b). Mezcla de plomo con suelo (c).	44
Figura 9. Cladodios sembrados en bolsas plásticas bajo invernadero en un DCA.	44
Figura 10. Inóculos de cinco cepas de bacterias promotoras de crecimiento vegetal.....	45
Figura 11. Método de cuarteos diagonales para la generación de una muestra compuesta de suelo.	48
Figura 12. Percepción de los productores sobre la contaminación del agua de riego.	56
Figura 13. Percepción sobre el grado de contaminación del agua de riego.....	58
Figura 14. Características o medio por el que percibe que el agua de riego está contaminada.	60
Figura 15. Características o medio por el que percibe que el agua de riego ha afectado al suelo.	62
Figura 16. Acciones para para disminuir las afectaciones por contaminación de agua de riego.	63

Figura 17. Percepción sobre afectaciones del agua de riego a cultivos.....	64
Figura 18. Percepción sobre cultivos afectados con el agua de riego.....	66
Figura 19. Percepción sobre afectaciones a la salud de los habitantes de la zona de riego.....	67
Figura 20. Grado de voluntad con el que los productores enfrentan el riesgo de enfermarse por la contaminación de los canales de riego según edad y escolaridad.....	71
Figura 21. Percepción sobre la probabilidad de afectación por la contaminación del agua de riego.	77
Figura 22. Percepción sobre malestar en animales que tienen contacto con el agua de riego..	82

I. INTRODUCCIÓN

La inversión extranjera directa ha contribuido al crecimiento económico de Latinoamérica; sin embargo, también ha sido la base para el traslado de la contaminación desde los países propietarios de la inversión extranjera directa que llega a América Latina, convirtiendo a la región en un “paraíso para la contaminación”, facilitado por su débil regulación ambiental (Freire-Vinueza *et al.*, 2021). La falta de regulación ambiental en países en desarrollo como México, asociada a la pobreza y la reducida inversión, innovación e implementación de tecnología, son causantes de la contaminación ambiental y, por lo tanto, de diversos riesgos a la salud y bienestar de las personas (Esquivel-Ferriño, Cantú-Cárdenas, & González-Santiago, 2018).

En México, el agua es un recurso cuya demanda se ha incrementado aceleradamente en los últimos años, debido al aumento en su consumo doméstico y productivo, tanto en la agricultura como en la industria (Vidal-Álvarez, 2018). A nivel nacional, el 54 % de las aguas residuales no se tratan y se vierten a cuerpos de agua, suelos y canales de riego, produciendo problemas de contaminación y riesgos para la salud humana y otros organismos vivos (Robledo-Zacarías *et al.*, 2017). De acuerdo con la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA, 2019), en México, un 29.06 % de los productores usa agua que viene de una presa, un 22.99 % usa agua de río y un 3.07 % usa agua de jagüey; mientras que un 6.6 % reportó usar agua negra (residual) para la agricultura.

Las afectaciones por el agua contaminada no se limitan a localidades, ya que a través de los cuerpos de agua se transportan los contaminantes que son vertidos en sus causas mientras no se encuentren con procesos de tratamiento. La cuenca Alto Atoyac (18A) se constituye por el río Alseseca, cuya unión se encuentra en Texmelucan, y por el río Atoyac, el cual pasa por el estado de Puebla y por los municipios Tepetitla, Nativitas, Tetlatlahuca, Zacatelco, Xicohtzinco y Papalotla en el estado de Tlaxcala. Adicionalmente, pasa por Ixtacuitla y Santa Apolonia Teacalco a través del DR056 mediante canales de riego. Los ríos reciben a las aguas residuales domésticas e industriales de la región, desembocando en la presa Valsequillo, fuera de los límites de la ciudad (INEGI, 2019).

Las aguas provenientes de Puebla se conducen hacia la presa Echeverría, donde antes de ingresar a la presa Valsequillo, se deriva un 25 % del caudal hacia la región de Atlixco, Puebla, a través

de un túnel y su energía cinética se utiliza para la producción de energía eléctrica (Morales, 2012). Como destino final, estas aguas irrigan la zona agrícola cañera, así como cultivos de hortalizas y flores, lo cual es una práctica frecuente ante la situación de escasez económica y desorganización comunitaria. Debido a que no existe un monitoreo continuo de la calidad del agua que hidrata a los cultivos, del suelo donde se vierte ni de la absorción de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) a través de los tejidos vegetales, se desconoce la magnitud del impacto ambiental producido por esta práctica en los agroecosistemas de la región, cuyos probables riesgos se han investigado (García-Céspedes, Lima-Cazorla, Ruiz-Gutierrez, Santana-Romero, & Calderón-Peñalver, 2016).

Debido al crecimiento demográfico e industrial, los ríos reciben contribuciones constantes de diversos elementos y sustancias que pueden perjudicar a los organismos vivos (Morales-García, Rodríguez-Espinosa, Shruti, Jonathan, & Martínez-Tavera, 2017). La toxicidad de los Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) como el As, Cd, Cr, Hg, Ni o Pb depende de su movilidad en el medio, relacionada con su especiación química, persistencia y tendencia de acumulación o bioacumulación (Caviedes, Muñoz, Perdomo, Rodríguez, & Sandoval, 2015). Las industrias que contribuyen con la descarga de EPT a cuerpos de agua en la región son automotrices, textiles y del procesamiento de pinturas, pigmentos, agroquímicos, metales, baterías y artículos electrónicos. No obstante, muy poco se conoce sobre las funciones ecofisiológicas, rutas de entrada a las plantas y criterios apropiados para precisar su riesgo (van der Ent, Baker, Reeves, Pollard, & Schat, 2013).

Para la región de Atlixco, Puebla, se han llevado a cabo estudios sobre esta problemática en diferentes sitios (Tamariz, 1996; Neri 2008; Morales-García *et al.*, 2017; Olvera, 2017). Como ejemplo, ya desde hace 26 años, Tamariz (1996) mencionó que las concentraciones de Cu, Cr, Co, Ni, Pb y Fe en aguas de la región atlixquense relacionadas con el río Nexapa, afluente del Atoyac, eran mayores a las permitidas en la normatividad mexicana (DOF, 1989). En este sentido, es necesario mejorar la calidad del agua de riego en esta zona y a la vez, reconocer qué cultivos son más apropiados para ser irrigados bajo estas condiciones mientras se mejora la situación.

Las aguas sin tratar que ingresan a la región de Atlixco son usadas para el riego de cultivos. Entre los municipios que reciben estas aguas están Atlixco y Santa Isabel Cholula, que siembran

una gran cantidad de cultivos: epazote (*Dysphania ambrosioides*), alfalfa (*Medicago sativa*), la hierba buena (*Mentha spicata*), huauzontle (*Chenopodium nuttalliae Saff.*), cilantro (*Coriandrum sativum*), cebolla (*Allium cepa*), maíz (*Zea mays*) y nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*), así como diversas especies de plantas ornamentales (flores) de interés comercial (Ocampo, 2004), lo que implica un riesgo a la salud para los consumidores de los alimentos cosechados. No obstante, dado que el nopal verdura que se corta para ser consumido, no se encuentra en contacto directo con el agua de riego, su cultivo se plantea como una oportunidad con ventajas sanitarias sobre especies de porte más bajo.

El nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*), es un vegetal base de la alimentación mexicana. Para el 2022 se reportó que en México se sembraron 12,596.70 ha de nopal verdura, con una producción de 868,956.28 t, con rendimiento de 69.8 t·ha⁻¹. Entre los principales estados productores se encuentran Morelos, Ciudad de México, México, Tamaulipas, Jalisco, Michoacán y Puebla, este último con una superficie de 405.65 ha, una producción de 31,692.69 t, y un rendimiento de 78.13 t·ha⁻¹ (SIAP, 2022).

Para el estado de Puebla, el cultivo se ha incrementado en municipios como Tlaxcalancingo, Ocoyucan, Atlixco y Santa Isabel Cholula, ya que, por su dinámica en el mercado, genera altos ingresos en ciertas épocas del año. El nopal, además, tiene importancia dada su capacidad bioestabilizadora de metales que se ha demostrado en sitios con una gran concentración de metales presentes en forma natural (Bañuelos & Lin, 2010), y por el uso de su pulpa para remover metales del agua (Fox, Pichler, Yeh, & Alcantar, 2012), por lo que puede ser un cultivo que contribuya a remover EPT del suelo agrícola.

Bajo condiciones de riego y a cielo abierto, en el 2021 para el estado de Puebla se registró una producción en tres municipios: Huaquechula, Atlixco y Santa Isabel Cholula, siendo en los límites de estos últimos dos municipios donde se encuentra la zona de estudio de la presente investigación. Para los municipios de Atlixco y Santa Isabel Cholula, el SIAP (2022) registró el 52.38 % de la producción de nopal verdura (1,198.77 toneladas) con una superficie plantada entre ambos municipios de 1,092.21 ha, el 55.09 % del total plantado en el estado, bajo condiciones de riego y a cielo abierto. Si bien, en ambos municipios el rendimiento de nopal verdura de riego (58.6 t·ha⁻¹ Atlixco y 48.36 t·ha⁻¹ Santa Isabel Cholula) fue menor que el rendimiento obtenido de temporal (90.09 t·ha⁻¹ Atlixco y 76.76 t·ha⁻¹ Santa Isabel Cholula), las

cosechas de riego representaron en el 2021 un ingreso de 4,051,240 pesos en Atlixco y de 401,310 pesos en Santa Isabel Cholula, el 53.8 % de los ingresos por el cultivo de nopal bajo condiciones de riego y a cielo abierto en todo el estado de Puebla.

Cultivos de importancia económica como el nopal, además podrían usarse en un contexto de contaminación de las aguas de riego y se podría hacer uso de Bacterias Promotoras de Crecimiento Vegetal (BPCV), para incrementar la capacidad de acumulación de metales que, al inocularse en la rizósfera de las especies vegetales, aceleran el crecimiento vegetal y fitoestabilizan los EPT provenientes del sustrato de cultivo (Mendoza-Hernández *et al.*, 2017; Carrillo-González, Perea-Vélez, & González-Chávez, 2017). La inoculación de BPCV en la rizósfera de nopal, podría incrementar su capacidad bioestabilizadora de EPT y facilitar su remoción del suelo donde se han sembrado.

Por lo anterior, se requiere diseñar un plan consistente para la evaluación continua del impacto ambiental provocado por el uso agrícola de aguas residuales. Este plan debe diagnosticar la calidad del agua, suelo y cultivos agrícolas en las épocas de seca y lluvia, con el fin de poseer las herramientas para proponer alternativas de manejo que disminuyan o eliminen la permanencia de EPT en el agroecosistema, de acuerdo con las condiciones biogeoclimáticas del lugar, así como de las prácticas socioculturales de los habitantes. También, resulta importante analizar la percepción de los productores ante el uso de aguas residuales que contienen EPT, e identificar alternativas propuestas para mejorar las prácticas agrícolas en favor de la salud y la obtención de rendimientos agrícolas óptimos.

De esta manera, el objetivo de la investigación fue evaluar la calidad del agua, el suelo y el material vegetal de *Opuntia ficus-indica* cultivar Atlixco con y sin Bacterias Promotoras de Crecimiento Vegetal (BPCV), en parcelas irrigadas con aguas residuales no tratadas provenientes del río Atoyac, así como la percepción de los productores respecto al riesgo por el uso de esta agua para la producción agrícola, en comunidades de los municipios de Santa Isabel Cholula y Atlixco, Puebla.

1.1 Problema de investigación

El río Atoyac desemboca en la presa Valsequillo, pero antes, un 25 % de su caudal es desviado en la presa Echeverría y conducido a través de un túnel a la Central Hidroeléctrica Portezuelo I en Atlixco para la generación de energía (Morales, 2012). Una vez aprovechada la energía hidráulica, una parte del agua se conduce a la Central Hidroeléctrica Portezuelo II, donde se aprovecha nuevamente su energía y se vierte finalmente al río Nexapa, mientras que la otra parte del agua se vierte en los canales de riego.

Así, la irrigación de vegetales de consumo humano con aguas provenientes del río Atoyac se ha tornado cuestionable, debido a que a este cause llegan aguas residuales sin tratar de Puebla y Tlaxcala, donde se han registrado por día 146.3 t de materia orgánica medida como DQO, 14.7 t de nutrientes, 0.14 t de metales pesados y 0.09 t de compuestos orgánicos tóxicos (DOF, 2011). Diversos autores (Silva, Muñoz, de la Isla de Bauer, & Infante, 2002; Sandoval, Pulido-Flores, Monks, Gordillo, & Villegas, 2009; Rodríguez-Tapia, Morales-Novelo, & Zavala-Vargas, 2012; Mancilla-Villa *et al.*, 2012; Morales-García, Rodríguez-Espinosa, & Jonathan, 2012; Morales-García, Jonathan, & Rodríguez-Espinosa, 2014; Bonilla, Ayala-Osorio, González-Contreras, Santamaría-Juárez, & Silva-Gómez, 2015; Handal *et al.*, 2015; Soto & Ramírez, 2017; Pérez *et al.*, 2018) han reportado la polución de las aguas que transporta el río Atoyac y de sus impactos económicos, sociales, ambientales y sanitarios.

De acuerdo con Ocampo (1997), en las parcelas irrigadas con aguas del canal Santa Lucía (conduce aguas del río Atoyac), se manejan cultivos hortícolas (calabacita, cebolla, cilantro, chícharo, ejote, haba, huauzontle, jitomate, rabanito, rábano, tomate, verde, chilacayote, lechuga orejona, picante), cultivos florícolas (cempasúchil, gladiola, terciopelo, crisantemo, polar), cultivos forrajeros (alfalfa, cañuela, maíz forrajero) y cultivos básicos (maíz y frijol).

Además de los cultivos anteriores, de acuerdo con Cervantes, Gallegos-Vázquez, Reyes, & Fernández (2005) el nopal verdura cultivar “Negrito” o “Atlixco” se origina y cultiva en el altiplano Central mexicano, con una superficie de siembra para el año 2005 cercana a las 600 ha, principalmente en el estado de Puebla, incluyendo al municipio de Atlixco. México es uno de los centros de origen del nopal (*Opuntia* spp.). Desde tiempos ancestrales, se han aprovechado sus frutos, flores y tallos modificados (nopalitos) para la alimentación, razón por la cual su

producción continúa en el territorio mexicano, resultando ser el principal productor (74 %) y consumidor a nivel mundial. No obstante, debido a sus características nutraceuticas, el nopal ha despertado el interés en mercados europeos y asiáticos. Dado su destino alimentario, la calidad del nopal se evalúa conforme a características físicas y químicas como su apariencia, sus dimensiones, su forma, contenido de mucílago y acidez, resaltando la inocuidad, salud y madurez como características primordiales.

En este sentido, algunos investigadores han estudiado el efecto bioabsorbente del nopal de EPT en agua (Miretzky, Muñoz, & Carrillo-Chávez, 2008; Barka, Abdennouri, Makhfouk, & Qourzal, 2013; Nharingo & Moyo, 2016; Rachdi, Srarfi, & Shimi, 2017; Choudhary, Ray, & Neogi, 2019). Por ejemplo, Nharingo & Moyo (2016) reportan de un 17 a un 100 % de remoción de EPT en agua, usando cladodios ya cosechados (frescos o en polvo) a través de coagulación-floculación y procesos de biosorción.

Por su parte, Bañuelos & Lin (2010) reportaron el efecto bioacumulante de selenio y boro en cinco clones distintos de *Opuntia ficus-indica*, los cuales fueron sembrados en camas rellenas con sedimento rico en sales de selenio y boro que naturalmente se encontraba en San Luis Drain, California. De este experimento, se encontró que después de 3 años de crecimiento, todos los clones disminuyeron hasta un 20 % en altura y producción de fruta en comparación con los clones de control y que *Opuntia* es capaz de volatilizar y acumular selenio. Así, los autores concluyen que se puede disminuir la concentración de selenio y boro en suelos a través de la siembra de *Opuntia*.

Por su parte, Hayek, Samrani, Lartiges, Kazpard, & Aigouy (2017) reportaron la absorción de plomo a través de la parte aérea y radical, concluyendo que su capacidad de bioabsorber plomo atmosférico a través de la superficie de sus cladodios y de absorber plomo a través de las raíces, lo hacen un biomonitor prometedor de plomo en regiones áridas y semiáridas. No obstante, no se ha estudiado el efecto de *Opuntia ficus-indica* cultivar Atlixco sembrado en condiciones de campo en suelos que contienen EPT. También se desconoce la distribución de los EPT en la parte aérea de la planta *Opuntia ficus-indica* cultivar Atlixco, dado que esta se estructura por niveles y es el último nivel donde se realiza el corte para la cosecha de nopal verdura.

Aunado a lo anterior, de acuerdo con Mendoza-Hernández *et al.* (2017), las cepas de las Bacterias Promotoras de Crecimiento (BPCV) *Enterobacter* K7, *Enterobacter* N9, *Serratia* K120, *Enterobacter* K131 y *Lysinubacillus* MC188 incrementaron la capacidad bioabsorbente de micronutrientes (Mn, Cu, Ni, Zn, Fe) y macronutrientes (Na, K, P) en plantas de chícharo, calabaza y girasol, por lo que se requiere observar si alguna de estas cepas es capaz de incrementar el potencial de absorción de nutrientes por *Opuntia ficus-indica* cultivar Atlixco de manera significativa e identificar si a la vez, incrementa la capacidad de crecimiento del nopal verdura.

Como mencionan Londoño-Franco, Londoño-Muñoz, & Muñoz-García (2016), urge “disminuir las cantidades de metales pesados en la industria, en la minería, en el sector agropecuario y más aún, en los casos que no sean de mayor utilidad”, para lo cual el sector privado, el sector gubernamental, las universidades y los centros de investigación, deben unir esfuerzos, de tal manera que se minimice el impacto de los EPT por el bien de la salud pública y del ambiente (Martínez, González, Paternina, & Cantero, 2017). Es imprescindible que se remedie la polución que a causa de la acumulación de los EPT durante varias décadas se ha producido, y se continuará produciendo de no tomar medidas desde la descarga de aguas residuales a cuerpos de agua y al alcantarillado urbano o municipal.

Para determinar el impacto ambiental causado por el uso de aguas residuales, es necesario conocer la calidad del suelo y del agua de riego y analizar el tejido vegetal de los cultivos irrigados utilizando distintos indicadores, entre ellos, la concentración de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) presentes. Aunado a ello, resulta imprescindible conocer la percepción de los productores ante el riego de utilizar aguas residuales no tratadas para el riego agrícola, de modo que sea posible explicar su conducta y determinar acciones para mejorar el manejo del agroecosistema. Se ha documentado que factores sociodemográficos como el nivel educativo de los participantes tienen influencia en la percepción del ámbito socioambiental (Aragonés, Tapia-Fonllem, Poggio, & Fraijo-Sing 2017; Ferreira, Navoni, Araújo, & Amaral, 2020). También se ha identificado que quienes cuentan con mayores ingresos económicos y mayor nivel educativo, mantienen mayores probabilidades de vivir en espacios sin riesgos ambientales (Bakhtsiyarava & Nawrotzki, 2017).

De esta forma se plantean las siguientes preguntas:

¿Cuál es la calidad física y química del agua y el suelo en parcelas irrigadas con aguas residuales no tratadas provenientes del río Atoyac, usadas para la producción de productos de consumo humano?

¿Cuál es la percepción de los productores sobre el riesgo por el uso de las aguas residuales no tratadas, manejadas por ellos en el riego agrícola?

¿Cuál es la capacidad fitoestabilizadora de Elementos Potencialmente Tóxicos de *Opuntia ficus-indica* cultivar Atlixco con y sin BPCV, en suelo irrigado con aguas residuales no tratadas provenientes del río Atoyac?

II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Objetivos

2.1.1 Objetivo general

Evaluar la calidad del agua, el suelo y el material vegetal de nopal verdura *Opuntia ficus-indica* cultivar Atlixco con y sin Bacterias Promotoras de Crecimiento Vegetal (BPCV), en parcelas irrigadas con aguas residuales no tratadas provenientes del río Atoyac que contienen EPT, y conocer la percepción de los productores ante el riesgo al manejar esta agua para la producción agrícola, en las localidades La Cantera y San Pablo Ahuatempan del municipio de Atlixco, y El Mirador del municipio de Santa Isabel Cholula.

2.1.2 Objetivos específicos

1. Analizar la calidad física y química del agua y del suelo de parcelas irrigadas con aguas residuales no tratadas provenientes del río Atoyac, utilizadas para la producción de productos agrícolas para el consumo humano.
2. Conocer la percepción de los productores sobre el riesgo por el uso de las aguas residuales no tratadas, manejadas por ellos en el riego agrícola.
3. Evaluar la capacidad fitoestabilizadora de Elementos Potencialmente Tóxicos de *Opuntia ficus-indica* cultivar Atlixco con y sin Bacterias Promotoras de Crecimiento Vegetal (BPCV), en suelo irrigado con aguas residuales no tratadas para conocer el efecto en su desarrollo vegetal.

2.2 Hipótesis

2.2.1 Hipótesis general

Las aguas residuales no tratadas provenientes del río Atoyac, así como los suelos irrigados con éstas, contienen Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT), por lo que no cumplen la calidad con base en la normatividad internacional. Esto lo perciben los productores al considerar que su uso es de alto riesgo, por lo que al inocular al menos una cepa de BPCV incrementará el crecimiento de *Opuntia ficus-indica* en parcela de riego y en invernadero, aún en presencia de EPT en el suelo y en el agua de riego.

2.2.2 Hipótesis específicas

1. En el agua y el suelo de parcelas irrigadas con aguas residuales no tratadas provenientes del río Atoyac, utilizadas para la producción de productos agrícolas para el consumo humano, existe presencia de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT), cuyas concentraciones no cumplen la calidad con base en la normatividad internacional.
2. Los productores que usan en la agricultura las aguas residuales no tratadas provenientes del río Atoyac, perciben que existen riesgos. Esta percepción está asociada a su edad, escolaridad, sexo, la cercanía de su parcela con el canal, con el punto de confluencia de las aguas del canal y a su antigüedad manejando estas aguas.
3. La inoculación de al menos una cepa de BPCV incrementará el crecimiento de *Opuntia ficus-indica*, en parcela de riego y en invernadero aún en presencia de EPT.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Percepción del riesgo

La percepción del riesgo es un paradigma psicométrico que se incrementa en presencia de enfermedades agudas relacionadas con la contaminación, así como con respecto a las variables relacionadas con el nivel educativo de los participantes y el ingreso familiar (Aragonés *et al.*, 2017). Ferreira *et al.* (2020), señala que el grado de percepción sobre temas socioambientales está influenciado por el perfil sociodemográfico de los participantes en la investigación.

En todo sistema agrícola debe promoverse el bienestar de los productores, entendido como el balance y la sinergia entre los diferentes capitales comunitarios: natural, cultural, humano, social, político, financiero y construido (Gómez-Martínez, Gutiérrez-Montes, & Declerck, 2014). Los productores son los tomadores de decisiones en el agroecosistema, por ello, el poder de adquisición económica del productor y su idiosincrasia son determinantes para la calidad del suelo, agua y materia vegetal producida en el sistema agrícola. El comportamiento individual ante el ambiente depende de la percepción que se tenga sobre la degradación ambiental (Barber, Biddlecom, & Axinn, 2003).

De acuerdo con Vargas (1994), la percepción puede entenderse como el proceso cognitivo consciente o inconsciente que consiste en el reconocimiento, interpretación y significación para la elaboración de juicios en torno a las sensaciones obtenidas del ambiente físico y social, en el que intervienen otros procesos psíquicos entre los que se encuentran el aprendizaje, la memoria y la simbolización. Asimismo, enuncia que la percepción es biocultural ya que, si bien, depende de los estímulos físicos y sensaciones involucrados, también depende de la selección y organización de dichos estímulos y sensaciones moldeadas por pautas ideológicas y culturales que determinan la conducta.

De manera intuitiva, el ser humano detecta riesgos a la salud con base en sus sentidos que definen su conducta hacia el riesgo. Por ello, se ha utilizado la actitud, la sensibilidad al riesgo y el temor específico como variables explicativas de la conducta (Sjöberg, 1996). La percepción de riesgo se define como el juicio subjetivo que hacen las personas sobre las características y severidad de un riesgo, principalmente con referencia a peligros naturales y amenazas al medio ambiente o la salud (Arellano, Camarena, Von & Daesslé, 2009). Sin embargo, la percepción no

es un añadido de eventos a experiencias pasadas sino una constante construcción de significados en el espacio y en el tiempo (Merleau-Ponty, 1975).

De acuerdo con Aragonés *et al.* (2017), la percepción del riesgo psicosocial engloba características multidimensionales que combinan creencias, actitudes, juicios, sentimientos y valores. En este sentido, el paradigma psicométrico muestra que la gente percibe riesgo en dos dimensiones cruzadas: la temida, causada por el miedo, y la desconocida, causada por la ignorancia, las cuales están a su vez relacionadas con la magnitud del daño percibido.

Los estudios sobre percepción de riesgo deben tomar en cuenta el comportamiento de las personas, ya que los diferentes comportamientos que cada individuo demuestra en una situación de riesgo, se ven afectados por cómo se percibe el riesgo y qué se cree sobre el mismo, afectando el comportamiento hacia el mismo riesgo. Así, será necesario atender la percepción del riesgo en cuanto a las personas que perciben el riesgo y a las propiedades atribuidas a los riesgos (Aragonés *et al.*, 2017).

Evaluar la percepción de los productores ante el riesgo de utilizar aguas residuales no tratadas para el riego agrícola, da apertura a la posibilidad de generar nuevas estructuras de pensamiento y de conducta, lo cual puede favorecer la sustentabilidad del manejo de las aguas residuales y del desarrollo de los agroecosistemas, aunado al fortalecimiento del bienestar de los productores.

3.2 Enfoques ecosistémicos

Freitas, Oliveira, Schütz, Freitas, & Camponovo (2007) mencionan dos tipos de enfoques ecosistémicos: enfoque de salud del ecosistema y enfoque ecosistémico de la salud. El primero, se enfoca en la identificación y medición de signos y síntomas de cambio en los ecosistemas y su potencial actual o futuro de afectar la salud humana, a fin de ofrecer respaldo a las decisiones que se tomen con información científica sobre el manejo del ecosistema. El segundo, valora el desarrollo de enfoques contextualizados y participativos, para comprender y buscar estrategias para manejar los cambios ecosistémicos, en un lugar dado y sus impactos en la salud de las comunidades locales.

El enfoque de salud del ecosistema integra las ciencias naturales, sociales y de salud. Con base en signos e indicadores, propone diagnosticar al ecosistema como “saludable” (deseable) y no

saludable (indeseable), con lo que ofrece opciones de manejo del ecosistema que reducen los costos de intervenciones posteriores al deterioro, pérdidas de oportunidades económicas, riesgos a la salud humana y interrupciones sociales debido a la degradación ambiental. Considera cuatro dimensiones: biofísica, socioeconómica, salud humana y la espaciotemporal; así como ocho indicadores para la salud del ecosistema: vigor, resiliencia, organización, mantenimiento de los servicios ecosistémicos, opciones de manejo, subsidios reducidos, daños a sistemas vecinos y efectos a la salud humana.

El enfoque ecosistémico de la salud implica que la enfermedad y manifestaciones en la salud ocurren en un contexto socio-ecológico, caracterizando a los ecosistemas como sistemas abiertos holárquicos autoorganizados. Busca identificar conexiones entre la salud humana y los procesos o eventos que modifican el estado y función de los ecosistemas. Su método consiste en elegir un ecosistema local o regional donde se manifiesten problemas de salud humanos, y se genera una estrategia plural para la investigación, incorporando diversos métodos y formas de participación de los actores sociales locales y de los especialistas. Estas relaciones dan cabida a propuestas de manejo adaptativo derivados de la construcción de escenarios, que se puede complementar con el manejo precautorio tradicional.

El enfoque ecosistémico permite identificar a los involucrados y a sus intereses, historias de vida, preocupaciones y perspectivas futuras. Su metodología se enfoca en el proceso y considera dos aspectos: que las fronteras del ecosistema o del problema ambiental se establezcan a través de la negociación entre varios actores sociales, y que los roles y responsabilidades de los diferentes actores sociales se definan en cada paso.

Para este estudio, se priorizará en el enfoque de salud del ecosistema, a fin de hacer hincapié en el diagnóstico y en la elaboración de propuesta de manejo. Sin embargo, debido a que en el ecosistema de estudio se llevan prácticas agrícolas, en adelante se llamará agroecosistema.

3.3 El agroecosistema como unidad de análisis

El agroecosistema se define como un sistema ecológico que cuenta con una o más poblaciones de uso agrícola y el ambiente con el cual interactúa (Blanco & Leyva, 2007). En dichos sistemas, se investigan y analizan los ciclos minerales, las transformaciones de la energía, los procesos biológicos y las relaciones socioeconómicas como un todo, reenfocando la investigación agrícola hacia el estudio de las interacciones complejas entre personas, cultivos, suelo, animales, etcétera mediante la interdisciplinariedad (Altieri y Nicholls, 2000). La agroecología es una ciencia, movimiento social y práctica, cuya unidad de análisis es el agroecosistema y, más ampliamente, el sistema agroalimentario. La agroecología como ciencia, se define como aquella que provee los conceptos y principios ecológicos y culturales para el diseño, manejo y evaluación de agroecosistemas sostenibles, donde la cultura adquiere la connotación de proceso adaptativo y transformador de los seres humanos sobre los ecosistemas, en términos de estructura simbólica, organización social, económica y política y de plataforma tecnológica (Altieri, 1987; Espinosa-Alzate, León-Sicard, & Ríos-Osorio, 2015). Los agroecosistemas pueden ser degradados por contaminantes introducidos que pueden acumularse o trasladarse.

3.4 Efectos a la salud por exposición a Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT)

De acuerdo con Londoño-Franco *et al.* (2016), algunos de los efectos a la salud producidos por la exposición a cadmio, arsénico, plomo, cobre y mercurio, se presentan a continuación:

3.4.1 Cadmio

La exposición crónica a cadmio produce anemia, disfunción renal, cálculos renales, osteoporosis, osteomalacia, trastornos respiratorios, hipertensión, trastornos nerviosos, pérdida de peso y apetito, cáncer de próstata y pulmón; mientras que en intoxicación aguda hay neumonitis y edema pulmonar, gastroenteritis, náuseas, vómito, dolor abdominal, diarrea, fallo renal, abortos espontáneos, muerte neonatal, así como efectos teratogénicos y mutagénicos.

3.4.2 Arsénico

La exposición crónica a arsénico causa lesiones en la piel y vasculares en sistema nervioso e hígado; mientras que la exposición aguda produce fiebre, hepatomegalia, melanosis, arritmia cardíaca, neuropatía periférica, anemia y leucopenia. La International Agency for Research on Cancer (IARC) clasifica al arsénico en el grupo 1 de sustancias cancerígenas como cancerígeno para humanos.

3.4.3 Plomo

La exposición crónica a plomo produce daño gastrointestinal, neuromuscular, nervioso, hematológico, renal y reproductivo. En niños, el plomo produce encefalopatía que puede desembocar en ataxia, reducción de la conciencia, coma y muerte. La exposición al plomo se ha relacionado con esterilidad, desencadenamiento de efectos teratogénicos y muerte neonatal. El plomo y los compuestos donde se encuentra enlazado están clasificados por la International Agency for Research on Cancer (IARC) en el grupo 2B como posiblemente cancerígeno para humanos.

3.4.4 Cobre

La exposición crónica a cobre, usado en recipientes que conservan alimentos, genera lesión hepática en niños, mientras que la exposición aguda por sulfato de cobre, potencialmente produce necrosis hepática y muerte. No existe evidencia de efectos cancerígenos causados por la exposición a cobre.

3.4.5 Mercurio

La exposición crónica a mercurio produce temblores, hipertrofia de tiroides, daño renal, taquicardia, gingivitis, cambios en la personalidad, eretismo, pérdida de memoria, depresión severa, delirios y alucinaciones. La exposición a metilmercurio en adultos produce efectos neurológicos negativos (temblores, pérdida de sensibilidad, ataxia, pérdida de visión y audición, espasmos, coma y muerte), mientras que durante el embarazo produce en el feto humano la aparición de lesiones congénitas del sistema nervioso. Los compuestos de metilmercurio se clasifican por la International Agency for Research on Cancer (IARC) en el grupo 2B como posiblemente cancerígenos para humanos.

3.5 Nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*)

De acuerdo con Cervantes *et al.* (2005), *Opuntia ficus-indica* cultivar “Negrito” o “Atlixco”, se caracteriza por ser vigorosa con un crecimiento habitualmente erecto, cuyos cladodios son de color verde oscuro sin espinas. Sus frutas son elípticas, con cáscara y pulpa color naranja, con alrededor de 14° Brix (14.10 ± 0.14), de una calidad comercial aceptable. Cultivado en su lugar de origen, el cultivar “Atlixco” madura en junio. Prioritariamente, es manejado para consumo humano como nopal verdura, pero también puede emplearse como cultivo forrajero. Maki-Díaz *et al.* (2015), sugirieron que la calidad del nopal verdura podría determinarse por su peso, longitud, anchura, grosor, número de hojas, acidez, contenido de humedad, clorofila y carotenoides, características aunadas a las disposiciones de la Norma Mexicana NMX-FF-068-SCFI-2006 (DOF, 2006) y FAO/WHO (1993) que establecen las especificaciones para el comercio de nopal verdura.

La fenología vegetal se refiere a la producción periódica de las estructuras vegetativas y reproductivas, es consecuencia de las interacciones entre factores bióticos y abióticos que establecen el tiempo más adecuado para el crecimiento y la reproducción de las plantas (van Schaik, Terborgh, & Wright, 1993). De acuerdo con Arba, Falisse, Choukr-Allah, & Sindic (2017), el nopal resiste a la sequía y a regiones áridas por su particular Metabolismo Ácido de las Crasuláceas (MAC o CAM por sus siglas en inglés). También porque ha desarrollado adaptaciones morfológicas típicas de las cactáceas (transformación de hojas en espinas, protección de cladodios por una cutícula impermeable) y mecanismos que les permiten usar el agua de manera eficiente (absorción de agua cuando está disponible y almacenamiento eficiente, reducción de la transpiración, etc.).

En el trópico, la producción de flores y brotes ocurre en la primavera, cuando la temperatura y la duración del día son mayores. Los límites favorables de temperatura y horas luz son de 14 ° C y 12 horas, respectivamente. Mientras que las flores surgen en cladodios de un año durante un mes, los brotes lo hacen principalmente en cladodios de dos o más años y sigue a la floración. La planta puede florecer por segunda vez durante el mismo año si las condiciones ambientales son favorables (es decir, temperaturas suaves, nieblas frecuentes o alta higrometría del aire).

Por su parte, Nobel & Castañeda (1998) mencionan que las dos variables ambientales que han recibido más atención en las investigaciones para el crecimiento de nopal, han sido la luz y el agua. Se ha observado que inicia más rápido el crecimiento de clones en los cladodios orientados favorablemente hacia la luz solar, los cuales regularmente crecen con la misma orientación.

De acuerdo con Ventura-Aguilar, Bosquez-Molina, Bautista-Baños, & Rivera-Cabrera (2017), el principal tejido conductor de agua muestra de cuatro a nueve vasos de xilema por mm^2 , que son altamente estables en diferentes condiciones climáticas. Sus hojas están prácticamente ausentes y tienen baja densidad estomática hundida (20 por mm^2), lo que reduce la pérdida de agua por transpiración. Los brotes de crecimiento se convierten en estructuras llamadas areolas desde donde se desarrollan flores, frutos y espinas; estos últimos, brindan protección para evitar la depredación y el daño por exposición prolongada a la luz del sol.

El cladodio también tiene una serie de filas de colénquima que son ocho veces más gruesas que en las plantas C3 y C4, seguido de varias capas de clorénquima que almacena compuestos fenólicos; hacia adentro, hay un anillo de haces vasculares colaterales. En el centro del tallo hay un parénquima y canales de mucílago dispersos. El mucílago constituye aproximadamente el 14 % del peso seco de los cladodios, y puede contener más del 30 % del total agua del parénquima de reserva. La succulencia del tallo resulta de la presencia de vacuolas de células grandes, que se presume que son un requisito previo para el almacenamiento de ácido málico durante la noche.

La actividad respiratoria del cladodio y, en consecuencia, sus cambios metabólicos durante el crecimiento y el desarrollo, se modifica con la edad, siendo su frecuencia mayor en los primeros días de crecimiento. Durante las primeras etapas del crecimiento de los cladodios, hay procesos activos de síntesis y demanda de energía para la división celular y posterior agrandamiento celular. Una vez que los cladodios se cosechan en su etapa inmadura, cuando han alcanzado un tamaño de unos 25 cm, el metabolismo entra en un proceso catabólico que produce cambios en algunos compuestos con propiedades funcionales, como el contenido de ácido málico, vitaminas y minerales.

En cuanto al desarrollo radical, Zúñiga-Tarango *et al.* (2009) hallaron que el patrón de desarrollo radical del cultivo de nopal de acuerdo con su abundancia radical, se ubica en un 96 % en la profundidad de 0 a 18 cm y un 3 % en el estrato de 18 a 36 cm. Sin embargo, acorde con la

longitud de raíces, la mayor actividad se presentó en la capa más profunda. La influencia del desarrollo radical con respecto al rendimiento se presentó inversamente proporcional al término de un año y medio.

En cuanto a la nutrición del nopal y su efecto en el rendimiento y calidad de la fruta, son altamente inconsistentes y contradictorios, lo cual hace muy difícil generar recomendaciones de fertilización. Sin embargo, de todos los nutrientes, el N es el más limitante en el caso del nopal y las concentraciones más altas se encuentran en los cladodios fértiles jóvenes (FAO, 2018).

De acuerdo con el estudio de Lopes *et al.* (2018), la acumulación de metales en la estructura de los cladodios presenta el siguiente orden decreciente de acumulación de macronutrientes: K> Ca> N> Mg> S> P, bajo cosecha anual y fertilización con niveles combinados de N y P. Asimismo, determinaron que la fertilización para el mantenimiento y producción de nopal debe planificarse de acuerdo con el potencial productivo, la gestión de la fertilización y la cosecha, y la región de cultivo, en función de los requisitos nutricionales y teniendo en cuenta la eficiencia de recuperación de nutrientes.

Por otra parte, los resultados esperados no serían semejantes al haber seleccionado una hortaliza, ya que hortalizas como alfalfa, epazote, hierba buena, cilantro, rábano o cebolla son plantas con metabolismo C3, cuyos tejidos son diferenciados de las plantas con Metabolismo Ácido de las Crasuláceas (MAC o CAM por sus siglas en inglés) como lo es el nopal, siendo estos más gruesos y mucilaginosos, con mayores sitios de absorción de EPT.

3.6 Biorremediación

3.6.1 Biodiversidad microbiana, contaminación de suelo y cultivos agrícolas

Entre microorganismos y plantas existen interacciones naturales de tipo benéfico, como la promoción del crecimiento vegetal, y de tipo perjudicial, como las que provocan enfermedades (Schirawski & Perlin, 2017). De acuerdo con Esquivel-Cote, Gavilanes-Ruiz, Cruz-Ortega, & Huante (2013), la relación benéfica más importante que se lleva a cabo en la rizósfera entre plantas y bacterias (rizobacterias) es de tipo mutualista.

A las rizobacterias que tienen un efecto benéfico se les llama Bacterias Promotoras del Crecimiento Vegetal (BPCV) y ya se ha comenzado a probar su inoculación para mejorar la

producción en cultivos agrícolas. Para lograr tal efecto, las BPCV usan mecanismos indirectos, directos o una combinación de ambos.

Efectos de los mecanismos indirectos son: disminuir o eliminar hongos, bacterias o nématodos fitopatógenos mediante la producción de sustancias antimicrobianas, sideróforos, enzimas líticas o una combinación de estas; competir por nutrientes o por nicho ecológico y estimular las defensas naturales de la planta por procesos como el de Resistencia Sistémica Inducida (RSI).

Mientras tanto, los mecanismos directos consisten en aumentar la disponibilidad de nutrientes en la rizósfera influyendo en el fitometabolismo, en los mecanismos de fijación de nitrógeno, síntesis de fitohormonas (citosinas, giberelinas, auxinas) vitaminas y enzimas; solubilizar fósforo inorgánico y mineralizar fosfato orgánico; aumentar la permeabilidad de la raíz; oxidar sulfuros; producir nitritos; acumular nitratos; disminuir la toxicidad de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) y estimular la desaminación del ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico o ACC, precursor del etileno, produciendo ACC desaminasa.

La ACC desaminasa es producida por rizobacterias para la obtención de α -cetobutirato (α -CB) y amonio. Para obtener estos dos metabolitos, las bacterias adheridas a la superficie de la semilla o a las raíces usan el triptófano de los exudados para sintetizar y liberar ácido indol-3-acético (AIA). Este AIA exógeno con el AIA endógeno, promueven la elongación de las células vegetales, induciendo a la vez la síntesis de la enzima ACC sintasa, encargada de convertir a S-adenosilmetionina (SAM) en ACC. Así, el ACC disponible en los exudados se hidroliza con el apoyo de la ACC desaminasa de las rizobacterias y se producen α -cetobutirato y amonio.

Con el fin de mantener equilibrio entre la concentración de ACC interna y externa, las plantas liberan más ACC reemplazando el que ya ha sido transformado por las rizobacterias y, ello reduce la biosíntesis de etileno dentro de la planta por falta de precursor. El interés en disminuir los niveles de etileno es prolongar la vida de la planta y mejorar su crecimiento y desarrollo, ya que cuando una planta se encuentra ante factores bióticos y abióticos adversos, incrementa la biosíntesis de etileno que induce la detención de la elongación radical, la promoción de raíces adventicias, la aceleración de la senescencia floral, la abscisión de frutos y la muerte. Por lo tanto, disminuir los niveles de etileno es una estrategia de adaptación de la planta ante el estrés ambiental, lo que realiza ligada a la intervención microbiana (Esquivel-Cote *et al.*, 2013).

En este sentido, se han incrementado las investigaciones sobre microbiota asociada a las raíces de las plantas. De acuerdo con Compant, Samad, Faist, & Sessitsch (2019), se define microbioma Central de la planta como los microorganismos que están estrechamente asociados con una determinada especie de planta o genotipo, independientemente del suelo y las condiciones ambientales. Cada especie vegetal es acompañada por un microbioma Central que poco varía intra-especie pero sí varía entre especies.

Schirawski y Perlin (2017) indican que las especies microbianas, asociadas a la planta desde la germinación, son determinantes para su salud y productividad durante su desarrollo. El microbioma de las semillas comprende tanto a los microorganismos endofíticos (que viven dentro de la planta) como a los microorganismos presentes en la superficie de la semilla. Incluso, es posible que la asociación entre semillas y microorganismos sea transmitida verticalmente a través de varias generaciones.

Estas afirmaciones indican que las plantas resistentes a la presencia ambiental de EPT, deben parte de su adaptabilidad a su microbioma Central. Sin embargo, se han realizado estudios en los que se mejora la respuesta de las plantas a la adversidad ambiental, después de inocular microorganismos exógenos en la rizósfera. Mendoza, Perea, Arriola, Martínez, & Pérez (2016) escogieron diez cepas bacterianas aisladas de la rizósfera de plantas que naturalmente se encontraban en los residuos mineros. Estas cepas fueron caracterizadas como BPCV, dado que mostraron al menos tres características: producción de AIA y de sideróforos, actividad enzimática de ACC desaminasa y solubilización inorgánica de fosfato.

Después de medir la actividad de ACC desaminasa y la síntesis de AIA en la presencia de Cu, As, Pb, Ni, Cd y Mn, se encontró que ambas fueron mayores en los tratamientos con Pb, As y Cu que con los tratamientos control de *Escherichia* N16, *Enterobacter* K131, *Enterobacter* N9 y *Serratia* K120; mientras que los tratamientos con Ni, Cd y Mn, afectaron negativamente a la actividad de ACC desaminasa y a la producción de AIA excepto en *Klebsiella* Mc173. La cepa bacteriana *Serratia* K120 mantuvo una correlación positiva entre la actividad de ACC desaminasa y la producción de AIA en presencia de todos los EPT probados, así como en el crecimiento vegetal de *Helianthus annuus* (girasol), demostrando un uso potencial en sistemas de fitorremediación, los cuales han sido estudiados recientemente (González-Chávez, Carrillo-González, Sánchez-López, & Ruiz-Olivares, 2017).

Existe una gran necesidad de promover una agricultura sostenible fruto de la inter y la transdisciplinariedad (Calvo, 2019), así como de una visión sistémica más aproximada a la realidad (Bertalanffy, 1987), a través de un pensamiento complejo (Morin, 2007). Para que la reproducción de la vida humana continúe a través del tiempo, debemos generar formas de incidir y relacionarse en la naturaleza lo más semejantes a como esta se autogestiona, promoviendo un desarrollo sostenible en lo económico, político, social y ambiental.

La agricultura es imprescindible para el desarrollo, ya que satisface las necesidades de los seres humanos en alimentos y una parte en fibras y combustibles. Con el fin de que esta actividad tan necesaria sea sostenible, es necesario dirigir esfuerzos en indagar y construir conocimiento empírico y racional, así como en diseñar, implementar y manejar sistemas agrícolas sostenibles. El conocimiento de los sistemas naturales permite así la posibilidad de generar estrategias agrícolas que, a semejanza de la naturaleza, produzcan para el bien común de la humanidad.

Parte de la solución al problema de la contaminación en los sistemas agrícolas, debe hallarse en el conocimiento empírico y racional de la naturaleza y, en el caso de la contaminación por EPT de suelos agrícolas, en el estudio y manejo de los microbiomas Centrales de las plantas y bacterias exógenas de interés agrícola ya que, debido a las características de la relación mutualista planta-rizobacteria mencionadas con anterioridad, esto puede jugar un papel fundamental en la sustentabilidad de los sistemas agrícolas.

3.6.2 Procesos de bioaumentación en el desarrollo agrícola

Los procesos de biorremediación son la bioestimulación y la bioaumentación. La bioestimulación de un sistema contaminado implica incorporar nutrientes a través de fertilizantes orgánicos e inorgánicos, para promover el crecimiento y estimulación de microorganismos autóctonos que pueden degradar los contaminantes de interés. La bioaumentación es la adición de cepas o consorcios de microorganismos nativos o no nativos con el fin de eliminar la contaminación (Islas-García, Peralta-Rodríguez, Vega-Loyo, López-Aguilar, & Rodríguez-Vázquez, 2016).

Jacques *et al.* (2008), evaluaron un consorcio bacteriano exógeno con cinco bacterias obtenidas de un sitio petroquímico que se encontraba en tratamiento por medio de prácticas agrícolas. El aislamiento de estas bacterias se realizó con respecto a su capacidad de degradar antraceno,

fenantreno y pireno presentes en el suelo a diferentes concentraciones. De esta evaluación resultó que el consorcio microbiano mineralizó alrededor de un 98 % de los tres hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) después de 70 días. Por su parte, la población microbiana autóctona del suelo no mostró mineralizar sustancialmente los HAP. Asimismo, cabe destacar que el efecto de las bacterias y hongos conformadores del consorcio, al inocularse por separado, fue menos efectivo en la mineralización de antraceno comparado con su efecto en consorcio. Esto indica un claro efecto sinérgico.

Por su parte, investigadores como Płociniczak, Kukla, Wątroba, & Piotrowska-Seget (2013) seleccionaron y evaluaron en laboratorio cepas resistentes a metales del género *Pseudomonas*, para aumentar la absorción de Zn, Cd y Cu por la planta metalofita mostaza (*Sinapis alba* L.), comercialmente reconocida por sus semillas. Además, examinaron los mecanismos de promoción del crecimiento de la mostaza en las cepas analizadas y su impacto en los brotes y raíces. El efecto de la inoculación edáfica de las cepas probadas dio como resultado concentraciones más altas de Zn, Cd y Cu en los brotes y raíces de las plantas en comparación con las cultivadas en suelo no inoculado. La mayor fitoextracción fue causada por *Pseudomonas fluorescens* MH15, que aumentó la acumulación de Zn, Cd y Cu en el tejido del brote en un 60 %, 96 % y 31 %, respectivamente, en comparación con las plantas de control. Aunado a lo anterior, todas las cepas incrementaron la translocación de Cd desde las raíces hasta los brotes de la mostaza. Cabe destacar que tres cepas de *Pseudomonas putida* (MH3, MH6, MH7) y dos cepas de *P. fluorescens* biotipo G y C (MH9 y MH15, respectivamente) tenían la capacidad de producir sideróforo, ACC desaminasa, AIA y HCN. Las cepas de *P. putida* también solubilizaron fosfato inorgánico. Con esta breve reseña se muestra que hay cepas capaces de promover la fitoextracción de EPT, al mismo tiempo que son BPCV, característica muy relevante para en el manejo de sistemas agrícolas.

3.6.3 Suelo agrícola irrigado con aguas residuales

Farhadkhani *et al.* (2018) señalan que, debido al problema mundial de la escasez del agua, el uso agrícola de aguas residuales se ha considerado como una alternativa viable para disminuir la presión hídrica. Sin embargo, debido al inadecuado tratamiento microbiológico de aguas residuales en los países en vías de desarrollo, se puede ver limitado el uso seguro del agua.

En su estudio desarrollado en Isfahan, Medio Oriente, Farhadkhani *et al.* (2018) destacaron que la calidad microbiana de las aguas residuales en términos de concentración de *E. coli* (4.18 Log NMP·100 mL⁻¹) rebasó los estándares de la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomendados para el riego de verduras de raíz y de hoja ($\leq 10^3$ y $\leq 10^4$ *E. coli* por 100 mL para cultivos de raíces y frondosos, respectivamente). Por su parte, no se registraron efectos significativos sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo regado con aguas residuales con tratamiento secundario en comparación con las parcelas de control regadas con agua de grifo, a excepción de la conductividad eléctrica (CE) y la relación de adsorción de sodio (RAS), que fueron ligeramente más altas en muestras de suelo regado con ARTS.

Aunque sí fue afectada la calidad microbiana del suelo regado por aguas residuales con tratamiento secundario, se detectó una concentración relativamente baja de *E. coli* en suelo. Tampoco se encontró contaminación microbiana de *E. coli* en el maíz y cebolla cosechados, pero sí en lechuga y cebollita. Con lo anterior, indicaron que las aguas residuales con tratamiento secundario podrían usarse de manera segura como fuente alternativa para el riego de verduras de raíz y de hoja. Aunque el contenido de materia orgánica del suelo aumentó al irrigar con aguas residuales, no se observaron diferencias significativas entre las parcelas irrigadas con aguas residuales con tratamiento secundario y agua de grifo. Una posible explicación es que el aporte microbiano de las aguas residuales incrementa la actividad microbiana del suelo, induciendo pérdidas de materia orgánica del suelo.

Sin embargo, el uso seguro de las aguas residuales depende primordialmente de la calidad del tratamiento que recibieron previamente. En un estudio realizado en el módulo II del Distrito de Riego 028, Tulancingo, Hidalgo, México por Hernández-Acosta, Quiñones-Aguilar, Cristóbal-Acevedo, & Rubiños-Panta (2014) se reportó que en los 16 sitios muestreados se rebasaron los límites máximos permisibles (LMP) de coliformes fecales (CF) en aguas residuales según la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997). Mientras que en el sitio las concentraciones de CF en aguas residuales fluctuaron de 2×10^4 a 2×10^{10} NMP·100 mL⁻¹, la norma establece un LMP de 1 000 a 2 000 NMP·100 mL⁻¹, para su disposición mediante riego. Por otra parte, las concentraciones de CF en suelos presentaron valores de 2×10^2 a 1×10^9 NMP·100 g⁻¹. Aunque no hay normas mexicanas que establezcan LMP de CF en suelo, con el LMP de la NOM-001-

SEMARNAT-1996 (DOF, 1997) de 2 000 NMP·100 mL⁻¹ se determinaba un sitio muy contaminado.

Fasciolo, Meca, Calderón, & Rebollo (2005), evaluaron la contaminación microbiológica residual en suelos regados con efluentes domésticos tratados y obtuvieron 33 NMP·100·g⁻¹ de suelo, correspondiente a *E. coli*, esto seis días después del último riego, disminuyendo su presencia 26 días después. Paluszak, Ligocka, Breza-Boruta, & Olszewska (2003) indicaron que las bacterias fecales pueden estar en el suelo de 21 a 27 semanas y, bajo ciertas condiciones (después de lluvias abundantes, temperatura de 10 °C y pH de neutro a alcalino) pueden filtrarse por el perfil del suelo y contaminar aguas subterráneas usadas como fuente de agua potable.

Por su parte, de acuerdo con Chen *et al.* (2018), las comunidades microbianas nativas son muy sensibles a los cambios ambientales, por lo tanto, se consideran indicadores de las condiciones ambientales locales, además de desempeñar un papel importante en el mantenimiento de la actividad biológica del suelo y la disminución de los niveles de contaminantes. Es esencial para la comunidad microbiana adaptarse al estrés ambiental en el área contaminada de EPT a largo plazo y, en relación a ello, se han resumido los mecanismos metabólicos subyacentes a la resistencia a los metales pesados, que incluyen: (I) exportar el ion directa y completamente, como en el caso de Cd⁺² y Zn⁺²; (II) exportar el ion al periplasma, seguido de reducción a un estado tóxico y soluble más bajo, como en el caso de Cr⁺⁶; y (III) convertir el ion a una forma menos tóxica, seguido del flujo, como en el caso de Hg⁺².

En este sentido, la inoculación de bacterias durante la siembra de cultivos en el suelo, se abre como una alternativa para ayudar a resolver el problema de la contaminación por EPT presentes en las diferentes matrices ambientales (agua, suelo, biota) donde, de acuerdo con Casiano & Paz (2018), el uso de plantas es también importante para conocer los efectos antropogénicos por ser sensibles ante condiciones climáticas y edafológicas.

3.6.4 Homeostasis en la relación microorganismo-ambiente

Ruberto, Vazquez, & Cormack (2003) reportaron que una cepa psicrófila *Acinetobacter* (resistente a temperaturas menores a los 5 °C) fue aislada de un río permanentemente contaminado, encontrándose que podía degradar 75 % de hidrocarburos en suelo, mientras que comunidades de bacterianas nativas podían degradar sólo 35 %.

Así, una buena estrategia para establecer una homeostasis en la relación microorganismo-suelo-riego con aguas residuales, consistiría en biorremediar a través de bioestimulación, incorporando al sistema fertilizantes orgánicos y con la bioaumentación, aislando microorganismos nativos o no nativos del sitio de estudio, cultivándolos y reinoculándolos (Zawierucha & Malina, 2011).

Esta biorremediación debe consistir en un diagnóstico e intervención recursivos, que vayan siendo ajustados a las condiciones según las conclusiones de las evaluaciones periódicas que se llevarían a cabo de los elementos del sistema agrícola, siendo los más destacados los factores físicos, químicos y microbiológicos de agua, suelo y materia vegetal. A esta estrategia se debe integrar un constante desarrollo en investigación que ofrezca nuevas técnicas alternativas que involucren la inoculación de microorganismos, siendo interesante la evaluación de consorcios nativos y no nativos.

La problemática de los metales pesados, como Pb, Ni y Cd presentes en el agua residual utilizada para riego, radica principalmente en que estos se acumulan en los suelos agrícolas y son peligrosos por la toxicidad que tienen en los diferentes cultivos (Pérez, Peña, López, & Hernández, 2016). De acuerdo con Londoño-Franco *et al.* (2016), los EPT alteran la sostenibilidad de la cadena trófica, provocando riesgos en la naturaleza y en la sociedad. Daños irreparables en la salud humana y animal como efectos teratogénicos y mutagénicos, cáncer e incluso la muerte, se producen al exponerse a los EPT de forma crónica o aguda, ya que alteran los procesos bioquímicos y fisiológicos, desencadenando las patologías.

La propuesta para un sistema de monitoreo continuo en donde se considera estas posibles afectaciones incluye de base, un trabajo entre sociedad, universidades y gobierno para concientizar en la importancia de la conservación y protección del ambiente en relación con los EPT. La organización social en este tema es trascendental. Aunado a lo anterior, es apremiante que a través del gobierno y con ayuda de los centros de investigación, se destinen recursos para el diagnóstico de cuerpos de agua receptores de aguas residuales con indicadores normados cuya publicación se realice periódicamente y de forma simultánea, ello permitirá hacer proyecciones para actuar a corto, mediano y largo plazo.

El control de las descargas de las industrias, sector agropecuario y municipios debe ser una prioridad, por lo que las auditorías deben ser observadas por los ciudadanos directamente

afectados para asegurar un procedimiento transparente. La investigación como acción participativa, debe llevar a desarrollar la implementación de acciones de biorremediación de manera sistemática con retroalimentación periódica según las semejanzas entre características ambientales, calidad de las aguas descargadas y especies agrícolas cultivadas.

3.7 Calidad de suelo, agua y materia vegetal del agroecosistema

3.7.1 Agua

3.7.1.1 Variables evaluables en el análisis de agua

El agua para riego define su calidad en función de su fuente de abastecimiento y se clasifica de acuerdo con su composición química, las condiciones del suelo y el tipo de cultivos que se pretende regar. Uno de los problemas recurrentes al regar con aguas residuales es su contenido en elementos traza, los cuales son perjudiciales en función de su concentración. En el Cuadro 1 se presentan los límites fitotóxicos de ciertos elementos traza de acuerdo con Salgado *et al.* (2012) que incluyen EPT.

Cuadro 1. Límites fitotóxicos de ciertos elementos traza en aguas de riego (ppm).

Elemento	A largo plazo	A corto plazo
Aluminio	1000	20.00
Arsénico	1000	10.00
Cadmio	0.005	0.05
Cromo	5.000	20.00
Cobalto	0.200	10.00
Cobre	0.200	5.00
Flúor	1.000	15.00
Hierro	5.000	20.00
Plomo	5.000	10.00
Manganeso	2.000	20.00
Níquel	0.500	2.00
Selenio	0.050	0.05

Fuente: adaptado de Salgado *et al.* (2012).

3.7.1.2 Normatividad mexicana de EPT en aguas residuales

México es uno de los países con los cuerpos de agua más contaminados de América Latina, junto con Barbados, Nicaragua, Panamá, Perú, República Dominicana y Venezuela (Campuzano *et al.*, 2014). Sin embargo, debido a la insostenible explosión demográfica que se vive en todo el mundo, la reutilización de aguas residuales se ha incrementado en los últimos cien años, siendo particularmente empleada para la agricultura de regadío. Por ello, en México, a fin de garantizar la idoneidad de este tipo de aguas, se publicó la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997), que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacional.

La NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997) define como límite máximo permisible al “*valor o rango asignado a un parámetro, el cual no debe ser excedido en la descarga de aguas residuales*”. Las concentraciones límite de EPT en aguas residuales se presentan en el Cuadro 2 (DOF, 1997).

Cuadro 2. Límites Permisibles para Metales y Cianuros.

Parámetros (mg·L ⁻¹)	Ríos				Embalses naturales y artificiales		Suelo	
	Uso en riego agrícola (A)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso en riego agrícola (A)	
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Arsénico	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.4	0.2	0.4
Cadmio	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.4	0.05	0.1
Cianuro	2	3	1	2	2	3	2	3
Cobre	4	6	4	6	4	6	4	6
Cromo	1	1.5	0.5	1	1	1.5	0.5	1
Mercurio	0.01	0.02	0.005	0.01	0.01	0.02	0.005	0.01
Níquel	2	4	2	4	2	4	2	4
Plomo	0.5	1	0.2	0.4	0.5	1	5	10
Zinc	10	20	10	20	10	20	10	20

P.D.= Promedio Diario P.M.= Promedio Mensual. (A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos. Fuente: adaptado de NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997).

3.7.1.3 Normatividad internacional de EPT en aguas residuales

De acuerdo con el Environment Canada (2000), Ministerio encargado de la regulación ambiental del Gobierno de Canadá, los límites recomendados de disposición de aguas de instalaciones federales de EPT se presentan en el Cuadro 3. Asimismo, se presentan los valores instantáneos de los parámetros de contaminación españoles (BOE, 2002) para los vertidos a fin de no ser excedidos, mientras las instalaciones de saneamiento y depuración cuenten con la capacidad para admitir el caudal y la carga contaminante de los mismos.

Cuadro 3. Recomendaciones de EPT para descargas de aguas residuales de instalaciones federales.

Parámetros	Concentración recomendada de descarga (mg·kg ⁻¹)	
	Canadá	España
Al total	2	15
As	0.05	1
Ba	1	10
B	5	3
Cd	0.005	0.5
Cr total	0.05	5
Cr ⁺⁶	0.05	1
Cr ⁺³	1	
Co	0.1	
Cu	0.2	5
HCN	0.025	2
F	5	
Fe	0.3	10
Pb	0	1
Mn	0.05	2
Hg	0	0.1
Mo total	0.2	
Ni	0.3	5
Se	0.05	0.5
Ag	0.1	1
Sn	5.0	5
Zn	0.5	10

Fuente: adaptado de Environment Canada (2000) y BOE (2002).

Por su parte, la Comunidad Europea ha clasificado la calidad de agua residual para uso agrícola en cuatro categorías, conforme al uso de los vegetales y sus partes comestibles. En el Cuadro 4 se presentan las clases de calidad de agua residual y métodos de riego permitido conforme a la UE (2020).

Cuadro 4. Clases de calidad de las aguas regeneradas y uso agrícola y método de riego permitidos.

Clase de calidad mínima de las aguas regeneradas	Categoría de cultivo ¹	Método de riego
A	Todos los cultivos de alimentos que se consumen crudos en los que la parte comestible está en contacto directo con las aguas regeneradas y los tubérculos que se consumen crudos.	Todos los métodos de riego
B	Los cultivos de alimentos que se consumen crudos cuando la parte comestible se produce por encima del nivel del suelo y, no está en contacto directo con las aguas regeneradas, los cultivos de alimentos transformados y los cultivos no alimenticios, incluidos los cultivos utilizados para alimentar a animales productores de carne o leche.	Todos los métodos de riego
C		Riego por goteo ² u otro método de riego que evite el contacto directo con la parte comestible del cultivo.
D	Cultivos destinados a la industria y a la producción de energía y de semillas.	Todos los métodos de riego ³

¹ en caso de que un tipo determinado de cultivo regado corresponda a varias categorías del Cuadro 4, se le aplicarán los requisitos de la categoría más estricta. ² el riego por goteo es un sistema de microrriego capaz de suministrar el agua en gotas o pequeños chorros a los vegetales y, consiste en un goteo de agua sobre el suelo o directamente bajo la superficie en cantidades muy pequeñas (2-20 L·h⁻¹), con un sistema de tubos de plástico de pequeño diámetro provistos de unos orificios denominados goteros de riego. ³ en el caso de métodos de riego que imitan la lluvia, debe prestarse especial atención a la protección de la salud de los trabajadores o los transeúntes. A tal efecto, se aplicarán las medidas preventivas adecuadas. Fuente: adaptado de UE (2020).

En el caso de la normatividad europea, la Directiva 2006/11/CE del parlamento europeo y del consejo de 15 de febrero de 2006 (CE, 2006), relativa a la contaminación causada por determinadas sustancias peligrosas vertidas en el medio acuático de la Comunidad Europea, se ocupa de la contaminación causada por determinadas sustancias peligrosas vertidas desde fuentes terrestres en el medio acuático de la Comunidad Europea, sean aguas continentales o costeras. En dicha directiva, figuran dos listas de residuos peligrosos:

La Lista I recoge aquellas sustancias que, por su toxicidad, persistencia en el medio o por su capacidad de bioacumulación son reguladas con un mayor rigor: i) compuestos organohalogenados y sustancias que pueden dar origen a compuestos de esta clase en el medio acuático, ii) compuestos organofosfóricos, iii) compuestos organoestánicos, iv) sustancias en las que esté demostrado su poder cancerígeno en el medio acuático o transmitido por medio de éste

(mercurio y sus compuestos, cadmio y sus compuestos), v) aceites minerales persistentes e hidrocarburos de origen petrolífero persistentes, vi) materias sintéticas persistentes que puedan flotar, permanecer en suspensión o hundirse y causar perjuicio a cualquier utilización de las aguas.

La Lista II recoge aquellas sustancias perjudiciales de menor peligrosidad cuyo vertido puede ser considerado como de efectos limitados, según las características de las aguas receptoras y su localización. Esta lista comprende las sustancias que forman parte de las categorías y grupos de sustancias enumerados en la lista I, para las que las Directivas contempladas en el anexo IX de la Directiva 2000/60/CE no han determinado los valores límite de emisión fijados por ellas. También comprende determinadas sustancias individuales y determinados tipos de sustancias que forman parte de las categorías y grupos de sustancias de Zn, Cu, Ni, Cr, Pb, Se, As, Sb, Mo, Ti, Sn, Ba, Be, B, U, V, Co, Tl, Te y Ag, que tienen efectos perjudiciales sobre el medio acuático, que pueden limitarse a una determinada zona y que están en función de las características de las aguas receptoras y su localización.

Se suman a esta lista i) los biocidas y sus derivados que no figuren en la lista I; ii) sustancias que tengan efectos perjudiciales para el sabor o el olor de los productos de consumo humano obtenidos del medio acuático, así como los compuestos que puedan dar origen a sustancias de esta clase en las aguas; iii) compuestos organosilícicos tóxicos o persistentes y sustancias que puedan dar origen a compuestos de esta clase en las aguas, con excepción de los compuestos biológicamente inofensivos o que dentro del agua se transformen rápidamente en sustancias inofensivas; iv) compuestos inorgánicos de fósforo y fósforo elemental; v) aceites minerales no persistentes e hidrocarburos de origen petrolífero no persistentes; vi) cianuros y fluoruros; así como vii) sustancias que influyan desfavorablemente en el balance de oxígeno, en particular el amoníaco y los nitritos.

La Comunidad Europea también cuenta con una directiva para normar la calidad ambiental sobre el uso del agua donde establecen límites para diversos contaminantes (CE, 2008). Derivado de las Normas de Calidad Ambiental (NCA), en el Cuadro 5 se muestran los límites de concentración máxima admisible de EPT con su número CAS (Chemical Abstracts Service) en aguas superficiales continentales que incluyen los ríos y lagos y las masas de agua artificiales o muy modificadas conexas, así como otras aguas superficiales en su valor medio anual (MA) de

concentración total de todos los isómeros y en su concentración máxima admisible (CMA), donde las NCA de la biota se refieren a los peces.

Cuadro 5. Normas de Calidad Ambiental para EPT en agua de la Comunidad Europea.

Nombre de la sustancia	No CAS	[$\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$]				[$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ de peso húmedo]
		NCA-MA Aguas superficiales continentales	NCA-MA Otras aguas superficiales	NCA-CMA Aguas superficiales continentales	NCA-CMA Otras aguas superficiales	NCA Biota
		≤ 0.08 (Clase 1)		≤ 0.45 (Clase 1)	≤ 0.45 (Clase 1)	
Cadmio* y sus compuestos	7440-43-9	0.08 (Clase 2)	0.2	0.45 (Clase 2)	0.45 (Clase 2)	
		0.09 (Clase 3)		0.6 (Clase 3)	0.6 (Clase 3)	
		0.15 (Clase 4)		0.9 (Clase 4)	0.9 (Clase 4)	
		0.25 (Clase 5)		1.5 (Clase 5)	1.5 (Clase 5)	
Plomo y sus compuestos	7439-92-1	1.2 ²	1.3	14	14	
Níquel y sus compuestos	7440-02-0	4	8.6	34	34	
Mercurio y sus compuestos	7439-97-6	0,05	0,05	0.07	0.07	20

* Por lo que respecta al cadmio y sus compuestos (No. 6), los valores de las NCA varían en función de la dureza del agua con arreglo a cinco categorías (clase 1: $< 40 \text{ mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$, clase 2: de 40 a $< 50 \text{ mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$, clase 3: de 50 a $< 100 \text{ mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$, clase 4: de 100 a $< 200 \text{ mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$, y clase 5: $\geq 200 \text{ mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$). ² estas NCA se refieren a las concentraciones biodisponibles de las sustancias. Fuente: adaptado de CE (2008).

3.7.2 Suelo

3.7.2.1 Variables evaluables en el análisis de suelo

Si bien, el concepto de calidad del suelo aún está en construcción, el Comité para la Salud del Suelo de la Soil Science Society of America (Karlen *et al.*, 1997) la definió como la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sostener la productividad de plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, y sostener la salud humana y el hábitat. Así mismo, de acuerdo con Salgado *et al.* (2012), la calidad del agua es determinante para la producción y calidad en el sistema agrícola, para el mantenimiento de la productividad del suelo de manera sostenible y para la protección del ambiente.

De acuerdo con Prieto, González, Román, & Prieto (2009), cuando la concentración de EPT en el suelo rebasa los límites máximos permisibles, provoca efectos inmediatos como inhibición del crecimiento normal y el desarrollo de las plantas, disturbio funcional en otros componentes del

ambiente, así como la disminución de las poblaciones microbianas del suelo, generándose una “polución de suelos”. En el Cuadro 6 se presentan las concentraciones máximas tolerables en suelo de EPT.

Cuadro 6. Concentraciones máximas tolerables en suelo de EPT.

Elemento	Concentración edáfica (mg·kg ⁻¹)
Antimonio	36
Arsénico	8
Bario	302
Berilio	0.2
Boro	1.7
Cadmio	4
Flúor	635
Plomo	84
Mercurio	7
Molibdeno	0.6
Níquel	107
Selenio	6
Plata	3
Talio	0.3
Vanadio	47

Fuente: adaptado de WHO (2006).

3.7.2.2 Normatividad mexicana de EPT en Suelo

De acuerdo a la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio (DOF, 2007), los límites de concentración de metales pesados para extensiones menores o iguales a 1 000 m², se presentan en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Concentraciones de referencia totales (CRT) por tipo de uso de suelo.

Contaminante	Uso	
	agrícola ¹ /residencial ² /comercial (mg·kg ⁻¹)	Uso industrial (mg·kg ⁻¹)
Arsénico	22	260
Bario	5400	67000
Berilio	150	1900
Cadmio	37	450
Cromo Hevalente	280	510
Mercurio	23	310
Níquel	1600	20000
Plata	390	5100
Plomo	400	800
Selenio	390	5100
Talio	5.2	67
Vanadio	78	1000

¹ en caso de que se presenten diversos usos del suelo en un sitio, debe de considerarse el uso que predomine.

² cuando en los programas de ordenamiento ecológico y de desarrollo urbano no estén establecidos los usos del suelo, se usará el valor residencial. Fuente: adaptado de DOF (2007).

3.7.2.3 Normatividad Internacional de EPT en Suelo

De acuerdo con Mendoza-Escalona *et al.* (2021), los suelos con mayor proporción de arcilla en su textura y altos valores en los parámetros de Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y contenido de materia orgánica, aumentan la retención de nutrientes y cationes esenciales y no esenciales para la vida, lo que implica un riesgo de fitotoxicidad para las plantas cultivadas en suelos con EPT. En el Cuadro 8, se presentan los límites máximos permisibles de las concentraciones totales de Co, As, Se, Ba, Cr total y hexavalente, Ni, Cu, Cd, Pb, Hg, Va, Mo y Zn, según normatividad de Ecuador (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2003), Canadá (CCME, 2007) y la Unidad Europea (UE, 2015a).

Cuadro 8. Límites permisibles de EPT en suelos agrícolas de Ecuador, Canadá y la Comunidad Europea.

LMP (mg·kg ⁻¹)	Ecuador*	Canadá	Comunidad Europea**
Co	10	40 (CCME, 2007)	
As	5	12 (CCME, 1997a)	
Se	1	1 (CCME, 2009)	
Ba	200	750 (CCME, 2013)	
Cr total	20	64 (CCME, 1997b)	150
Cr ⁺⁶	2.5	0.4 (CCME, 1997b)	
Ni	20	45 (CCME, 2015)	90
Cu	30	63 (CCME, 1999a)	100
Cd	0.5	1.4 (CCME, 1999b)	3
Pb	25	70 (CCME, 1999c)	150
Hg	0.1	6.6 (CCME, 1999d)	1
Va	25	130 (CCME, 1997c)	
Mo	2	5 (CCME, 2007)	
Zn	60	250 (CCME, 2018)	300

* (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2003). **Unidad Europea (UE, 2015a).

3.7.3 Material vegetal

3.7.3.1 Variables evaluables en el análisis de material vegetal

De acuerdo con Alcántar, Trejo-Téllez, Fernández, & Rodríguez (2013), las plantas sintetizan sus compuestos metabólicos y estructurales con determinados compuestos que se encuentran en el medio que las rodea, el carbono proviene del bióxido de carbono del aire, el hidrógeno del agua y el oxígeno tanto del aire, agua y sales como nitratos, sulfatos, fosfatos, boratos y carbonatos. Sin embargo, otros catorce elementos son esenciales para la fisiología vegetal.

Arnon & Stout (1939) determinaron que un elemento es esencial cuando: a) con la ausencia del elemento en cuestión no es posible un desarrollo normal de la planta y ésta es incapaz de completar su ciclo vital, b) los síntomas de deficiencia deben corregirse cuando la planta es abastecida con el elemento correspondiente, no admitiendo un elemento sustituto, c) las funciones o influencia en el metabolismo deben ser conocidas y, d) el elemento debe tener una acción directa en la nutrición de la planta. En razón a que las plantas no poseen un mecanismo de absorción totalmente selectivo, pueden absorber tanto elementos esenciales como a los superfluos y perjudiciales.

Es necesario determinar el grado de riesgo ambiental de los metales pesados sobre los cultivos agrícolas mediante bioensayos ecotoxicológicos. Ante la presencia de EPT, las plantas pueden restringir el transporte del metal a la parte aérea si son sensibles a este, mientras que pueden acumularlo en la parte aérea de forma no tóxica si están adaptados a suelos contaminados (Prieto *et al.* 2009).

3.7.3.2 Normatividad internacional de EPT en material vegetal

De acuerdo con la FAO/WHO (2019), por recomendación de la Comisión del Codex Alimentarius (CAC), deben aplicarse los niveles máximos de sustancias tóxicas a los productos que circulan en el comercio internacional. Para las hortalizas de hoja, el Codex Alimentarius establece un nivel máximo de $0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y $0.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de Cd y Pb, respectivamente. Mientras tanto, para las hortalizas de tallo se establece un nivel máximo de $0.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de Cd y no se establece concentración para Pb por el Codex Alimentarius (Cuadro 9).

Cuadro 9. Contenido máximo de EPT en vegetales en la Unión Europea.

Metal	Contenidos máximos ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ peso fresco)	Productos alimenticios*
Cd	0.02	Hortalizas de fruto, salvo las berenjenas
	0.040	Hortalizas del género <i>Brassica</i> distintas de las hortalizas de hoja del género <i>Brassica</i>
	0.10	Hortalizas de hoja del género <i>Brassica</i>
	0.10	Hortalizas de hoja, salvo espinacas y hojas similares, plantones de mostaza y hierbas frescas
	0.20	Espinacas y hojas similares, plantones de mostaza y hierbas frescas
Pb	0.030	Tallos jóvenes distintos a puerros y apios
	0.10	Raíces y tubérculos (excluidos los salsifíes, el jengibre y la cúrcuma frescos) bulbos, inflorescencias y cogollos del género <i>Brassica</i> , colirrábanos, leguminosas y hortalizas de tallo
	0.30	Hortalizas de hoja del género <i>Brassica</i> , salsifíes, las setas siguientes: <i>Agaricus bisporus</i> (champiñón), <i>Pleurotus ostreatus</i> (seta de ostra) y <i>Lentinula edodes</i> (seta shiitake) y hortalizas de hoja (excluidas las hierbas frescas)
	0.05	Hortalizas de fruto distintas del maíz dulce

* El contenido máximo se aplica después de lavar las frutas o las hortalizas y separar la parte comestible. Fuente: adaptado de UE (2021a, 2021b).

En el caso particular de la Unión Europea, desde el 2002 (CE/UE, 2002), se han establecido diversos reglamentos en los que se fijan el contenido máximo de metales pesados en productos

alimenticios. En el Cuadro 9 se presenta un resumen del contenido máximo de EPT en vegetales. Dichos reglamentos, indican los límites máximos de determinados contaminantes en los productos alimenticios (CE/UE, 2005; CE/UE, 2006; CE/UE, 2008; UE, 2011) como plomo (UE, 2015b; UE, 2021a), cadmio (UE, 2014; UE, 2021b), arsénico inorgánico (UE, 2015c) mercurio (CE, 2006) y estaño (CE, 2006) en alimentos.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

Por el perfil interdisciplinario de la investigación, se abordaron dos enfoques: el enfoque técnico, que contempla la toma de muestras de suelo, agua y tejido vegetal proveniente de los experimentos establecidos para su posterior análisis físico y químico, así como el enfoque social, con el fin de registrar e interpretar la percepción del riesgo de usar aguas residuales no tratadas provenientes del río Atoyac para la irrigación, en los municipios de Atlixco y Santa Isabel, Cholula, Puebla.

4.1 Características de la zona de estudio

La zona de estudio abarcó tres comunidades: La Cantera de San Pablo Ahuatempan, Atlixco, San Pablo Ahuatempan, Atlixco y El Mirador, Santa Isabel Cholula (INEGI, 2022b). La altura sobre el nivel del mar oscila entre los 1 878.4 y los 1 913 m y se encuentra entre los paralelos 18°55'09.1" N y 18°56'28.9" N y los meridianos 98°22'21.7" W y 98°20'39.5" W, con un área de 335.05 hectáreas, de la superficie irrigada con las aguas provenientes de la presa Manuel Ávila Camacho o Valsequillo (Carrillo-Huerta, & Gómez-Bretón, 2020).

De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2020 (INEGI, 2022b), los productores de nopal habitan en las localidades de La Cantera de San Pablo Ahuatempan, Atlixco (clave INEGI 0177, 18°55'29.269" N 98°22'16.377" W, 1870 m); San Pablo Ahuatempan, Atlixco (clave INEGI 0234, 18°55'33.187" N 98°21'24.097" W, 1879 m) y El Mirador, Santa Isabel Cholula (clave INEGI 0007, 18°55'44.161" N 98°22'01.978" W, 1916 m), cuya población total es de 103 personas (58 mujeres y 45 hombres), 38 personas (15 mujeres y 23 hombres), así como 205 personas (101 mujeres y 104 hombres), respectivamente. En la Figura 1, se puede observar la zona del presente estudio, donde convergen los límites de los municipios antes mencionados.

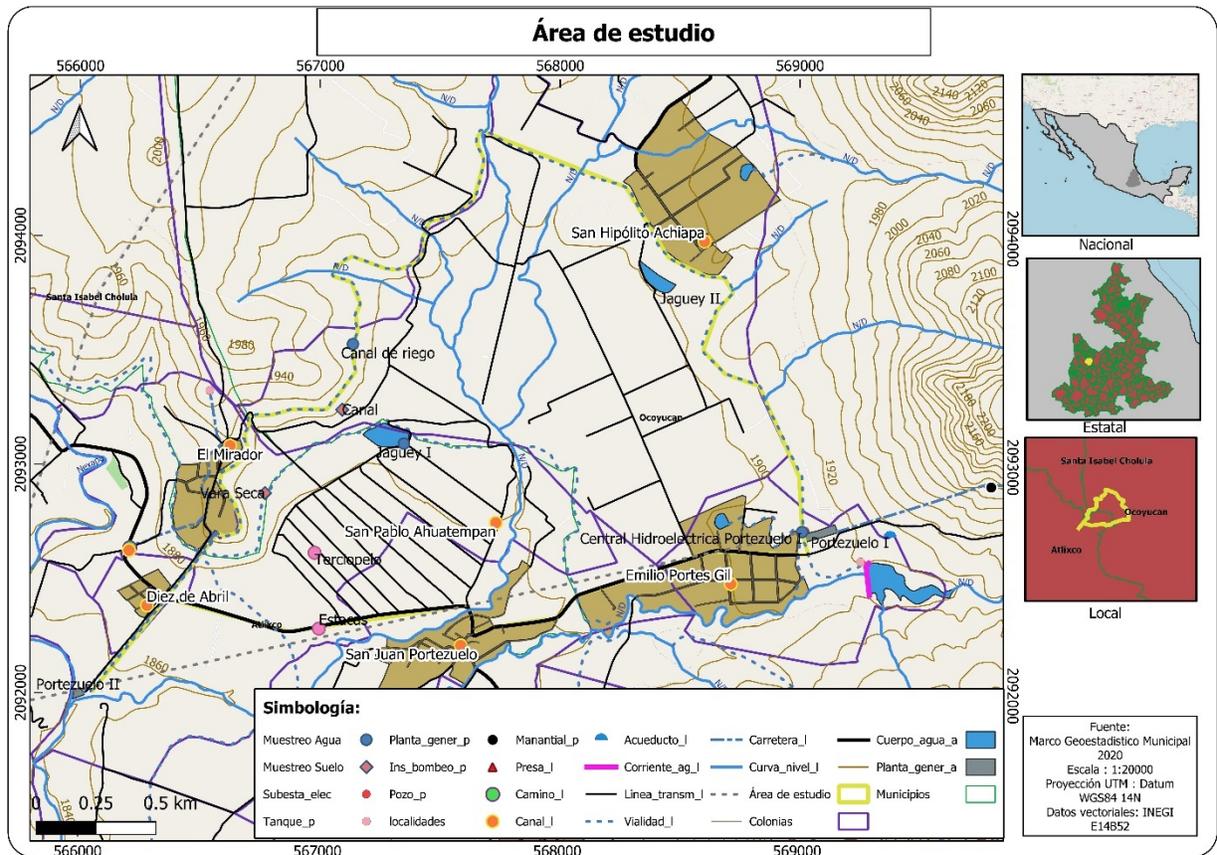


Figura 1. Localización del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia con información de campo y datos de INEGI (2022a, 2022b). Marco Geostatístico Municipal 2020, Datos vectoriales: INEGI: E14852.

El clima es $C(w_1)(w)$ (INEGI, 2008), que corresponde a un clima templado húmedo con porcentaje de lluvia invernal menor a 5 % e intermedio con respecto al grado de humedad, cuyo cociente de $P \cdot T^{-1}$ oscila entre 43.2 y 55.0. La cubierta vegetal es de selva baja en las zonas no perturbadas y el tipo de agricultura que se puede efectuar es de temporal con moderadas deficiencias de humedad; es decir, al año se puede sembrar solo un ciclo agrícola durante la época de lluvia con riegos de auxilio y riego casi completo si se establece un segundo ciclo en la época de seca del año (INEGI, 2005a).

La temperatura media anual oscila entre los $16^{\circ} C$ y $18^{\circ} C$ (INEGI, 2007), la precipitación media anual varía entre 800 y 1 000 mm (INEGI, 2006), el número de meses al año que el suelo permanece húmedo es entre 7 y 8 meses. De junio a enero son los meses del año con el suelo a capacidad de campo (INEGI, 2005b). La evapotranspiración oscila entre 600 y 700 $mm \cdot anual^{-1}$ (INEGI, 2004). Se registra periodo de canícula en la zona de estudio (INEGI, 2003).

La población de 12 años y más económicamente activa y ocupada es de 52 personas (50.5 %) con 26 mujeres (25.2 %) y 26 hombres (25.2 %) en La Cantera de San Pablo Ahuatempan, Atlixco; 14 personas (36.8 %) con 4 mujeres (10.5 %) y 10 hombres (26.3 %) en San Pablo Ahuatempan, Atlixco y de 93 personas (45.4 %) con 31 mujeres (15.1 %) y 62 hombres (30.2 %) en El Mirador, Santa Isabel Cholula (INEGI, 2022b).

4.2 La agricultura de la zona de estudio

Entre las especies vegetales irrigadas con aguas provenientes del río Atoyac se encuentran epazote (*Dysphania ambrosioides*), alfalfa (*Medicago sativa*), perejil (*Petroselinum crispum*), hierba buena (*Mentha spicata*), huauzontle (*Chenopodium nuttalliae* Saff.), cilantro (*Coriandrum sativum*), cebolla (*Allium cepa*), nube (*Gypsophila paniculata*), crisantemo (*Chrysanthemum* spp.), gladiola (*Gladiolus* spp.), aster (*Aster* spp.), maíz (*Zea mays*), sorgo (*Sorghum* spp.), calabacita (*Cucurbita pepo*), tomate (*Physalis ixocarpa*) y nopal (*Opuntia* spp.). Específicamente, este estudio se enfocó a este último cultivo, el nopal, cuya superficie plantada va en aumento (Cuadro 10).

Cuadro 10. Producción de nopal por municipios del estado de Puebla a cielo abierto y de riego.

Municipio	Producción (t)	Superficie (ha) Plantada	Superficie (ha) Cosechada	Rendimiento (t·ha ⁻¹)	PMR (\$·t ⁻¹)	Valor Producción (miles de Pesos)
Puebla	2,288.81	37.85	37.85	60.47	3,615.10	8,274.27
1 Atlixco	1,089.96	18.6	18.6	58.6	3,716.87	4,051.24
Porcentaje (%)	47.6	49.1	49.1			49.0
2 Huaquechula	1,090.04	17	17	64.12	3,506.04	3,821.72
Porcentaje (%)	47.6	44.9	44.9			46.2
Santa Isabel						
3 Cholula	108.81	2.25	2.25	48.36	3,688.15	401.31
Porcentaje (%)	4.8	5.9	5.9			4.9

Fuente: adaptado de SIAP (2022).

Para el 2022, se reportó del estado de Puebla una superficie cosechada a cielo abierto y de riego de 37.85 ha, con 2,288.81 toneladas y un rendimiento de 60.47 t·ha⁻¹. Solo tres municipios en todo el estado poblano registran producción bajo estas condiciones y son Atlixco, Huaquechula y Santa Isabel Cholula (SIAP, 2022).

4.3 Técnicas de investigación

Tanto para la generación de datos sociales como técnicos se usaron técnicas cuantitativas. Para el aspecto social, se usó la entrevista, y para los aspectos técnicos, el experimento en parcela y en invernadero. En laboratorio se realizaron análisis de agua, suelo y planta de nopal.

4.3.1 La encuesta

Se utilizó la encuesta a través del cuestionario aplicado a 48 productores (censo, el universo de trabajo) que en el 2021 produjeron nopal en la zona de estudio. El cuestionario consistió en 126 preguntas, abordando los siguientes temas: aspectos sociodemográficos, percepción de problemas en la zona de riego, percepción del riesgo por enfermarse al emplear las aguas, experiencia agrícola, manejo agronómico del nopal, economía, y finalmente, la importancia social que los productores le asignan a ciertas relaciones interpersonales y culturales en el medio en el que se desenvuelven.

Las preguntas sobre proceso productivo se realizaron considerando el estudio de Márquez-Berber, Torcuato-Calderón, Almaguer-Vargas, Colinas-León, & Khalil-Gardezi (2012). Las preguntas sobre percepción se aplicaron conforme a las propuestas de Catalán-Vázquez, Riojas-Rodríguez, Jarillo-Soto, & Delgadillo-Gutiérrez (2009) y Aragonés *et al.* (2017). En este último, se incluye una adaptación de la escala de percepción de riesgo propuesta por Slovic, Fischhoff, & Lichtenstein (1980) con 18 ítems y cuatro puntos en vez de siete debido al bajo nivel educativo de los participantes y agregando un ítem para medir la magnitud del riesgo percibido (probabilidad de enfermedad relacionada con la contaminación del agua de riego) también con una escala de cuatro puntos, donde uno indicaba no probabilidad y cuatro representaba una gran probabilidad.

Asimismo, con base en Aragonés *et al.* (2017), se dedicó una sección de 11 ítems a las recomendaciones hechas por las autoridades a fin de inducir prácticas de higiene entre los regantes que se evaluaron en una escala de uno a cuatro, donde uno no fue útil y cuatro muy útil. El cuestionario completo se presenta en el ANEXO A.

4.3.2 Diseño experimental y cultivo de nopal en campo

Se establecieron dos diseños experimentales de bloques completos al azar y de seis tratamientos (T1: *Serratia* K120, T2: *Serratia* MC119, T3: *Enterobacter* K131, T4: *Escherichia coli* N16, T5: *Enterobacter* N9 y T6: control sin inocular cepa) con cinco repeticiones, empleando como planta indicadora al nopal (*Opuntia ficus-indica*) cultivar Atlixco. Cada unidad experimental se constituyó de 12 plantas con un área de 2.7 m², donde sólo dos conformaron la parcela útil, remarcada en la Figura 2 con un borde azul.

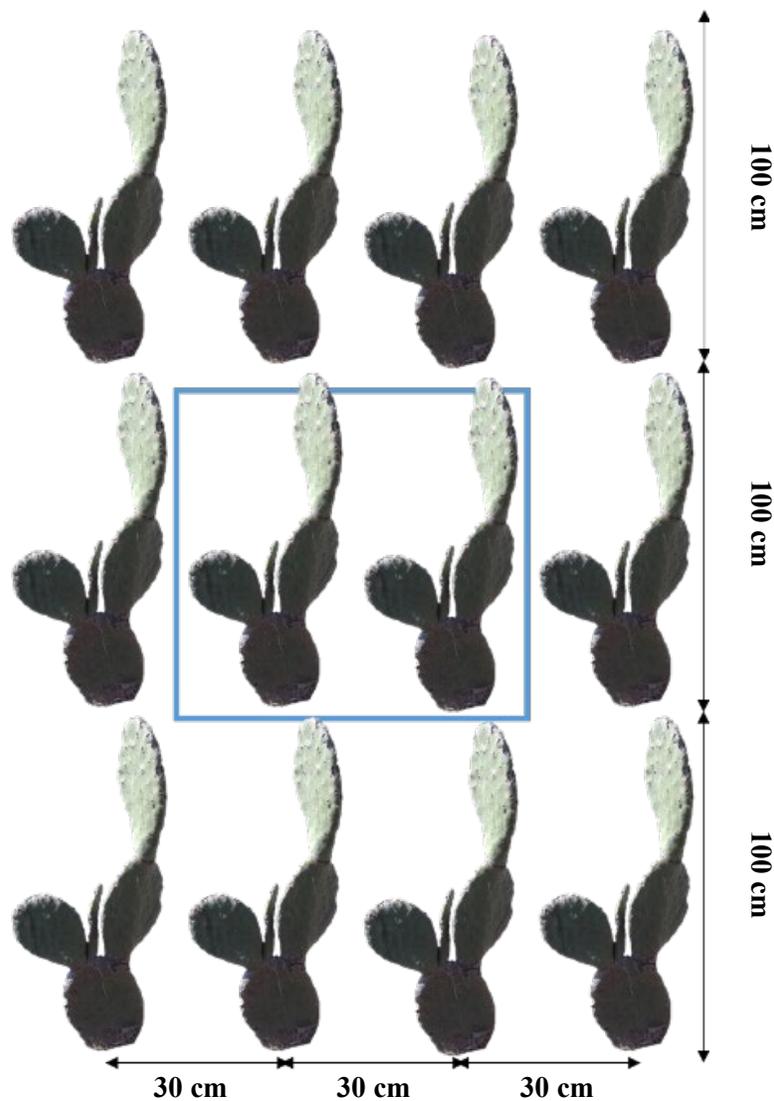


Figura 2. Representación de una unidad experimental.

Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Cada una de las dos parcelas tuvo 30 unidades experimentales (UE), por lo que se necesitaron por cada parcela 81 m² y 360 plantas de *Opuntia ficus-indica* cultivar Atlixco. En las Figuras 3 y 4 se presentan los croquis de los experimentos instalados para probar la capacidad fitoestabilizadora de *Opuntia ficus-indica* y si esta se modifica en presencia o ausencia de BPCV.

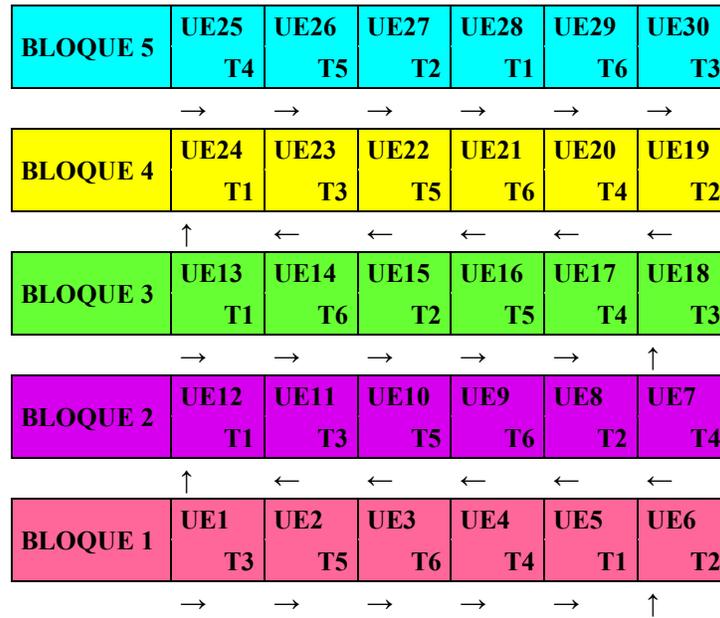


Figura 3. Croquis Bloques Completos al Azar Parcela 1 “Estacas”.
Fuente: Elaboración propia con información de campo.

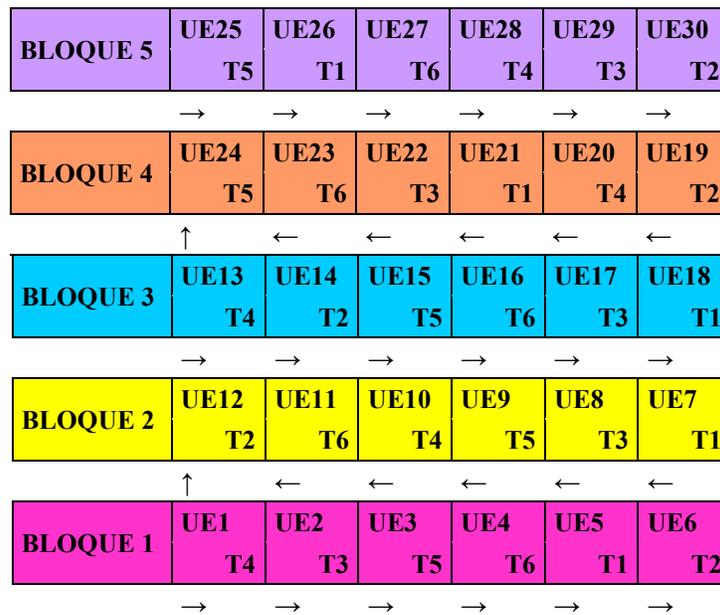


Figura 4. Croquis Bloques Completos al Azar Parcela 2 “Terciopelo”.
Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Se preparó una solución buffer para diluir las bacterias con una concentración al 0.1 M de cada soluto (sulfato monobásico y sulfato dibásico). Se realizaron tres aplicaciones mensuales de los tratamientos en los meses de septiembre, octubre y noviembre del año 2019, colocándose al pie de cada cladodio 50 mL de cada cepa bacteriana previamente diluida al 1.6 % en la solución buffer. En la Figura 5 se presenta la aplicación de las BPCV.



Figura 5. Aplicación de cepas de BPCV en las parcelas experimentales.

Fuente: Elaboración propia con imágenes de campo.

4.3.3 Diseño experimental y cultivo de nopal en invernadero

Asimismo, a fin de contar con una referencia controlada de la concentración del Elemento Potencialmente Tóxico plomo, se instaló un experimento con *Opuntia ficus-indica* cultivar Atlixco en el invernadero del Colegio de Postgraduados *Campus* Puebla. Se obtuvieron 30 cladodios desarrollados para su propagación en San Pablo Ahuatempan, Atlixco, Puebla (Figura 6). Se mantuvieron en un sitio seco y a la sombra para facilitar el secado en la zona de corte.



Figura 6. Cladodio para siembra en invernadero.
Fuente: Elaboración propia con imagen de campo.

Se colectaron 600 kg de suelo en la localidad de San Pablo Ahuatempan en una parcela agrícola con coordenadas $18^{\circ} 55' 22.026''$ N, $98^{\circ} 21' 34.51''$ W a 1871 msnm. Se obtuvo el suelo después de la cosecha de cebolla (Figura 7).



Figura 7. Suelo colectado en la localidad de San Pablo Ahuatempan.
Fuente: Elaboración propia con imagen de campo.

Por medio de nitrato de plomo, se añadió plomo al sustrato a una concentración de 134 ppm de plomo total extraído según la EPA 3051 y 57.5 ppm de plomo disponible con ácido dietilntriaminopentaacético (DTPA), extraído según la NOM-0021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002). En la Figura 8 se presenta la preparación del sustrato de cultivo.



Figura 8. Suelo cernido (a). Nitrato de plomo (b). Mezcla de plomo con suelo (c).
Fuente: Elaboración propia con imágenes de campo.

Se evaluó el establecimiento y crecimiento de *Opuntia ficus-indica* cultivar Atlixco en el sustrato descrito contenido en bolsas que se mantuvieron en condiciones de invernadero, con temperatura e intensidad lumínica controladas (Figura 9). Se realizaron cinco repeticiones por tratamiento (T1: *Serratia* K120, T2: *Serratia* MC119, T3: *Enterobacter* K131, T4: *Escherichia coli* N16, T5: *Enterobacter* N9 y T6: control sin inocular cepa) con un cladodio plantado por repetición en bolsas individuales de 40 cm x 40 cm en un Diseño Completamente al Azar (DCA).



Figura 9. Cladodios sembrados en bolsas plásticas bajo invernadero en un DCA.

Fuente: Elaboración propia con imagen de invernadero Colegio de Postgraduados, *Campus* Puebla.

Se preparó una solución buffer para diluir las bacterias con una concentración al 0.1 M de cada soluto (sulfato monobásico y sulfato dibásico). En tres ocasiones, se aplicaron al pie de cada cladodio 50 mL de cada cepa bacteriana previamente diluidas al 1.6 % en la solución buffer.

4.3.4 Análisis en laboratorio

4.3.4.1 Cultivo de BPCV

Las cepas bacterianas *Serratia* K120, *Serratia* MC119, *Enterobacter* K131, *Escherichia coli* N16 y *Enterobacter* N9 se reprodujeron en caldo Luria Bertani (LB) a 30 °C, durante 48 h a 80 rpm. Se centrifugaron a 8000 rpm y re suspendieron en buffer de fosfato de sodio monobásico y dibásico 0.1 M a pH 7.4 para obtener una absorbancia de 0.5, que corresponde aproximadamente a $1 \cdot 10^9$ UFC·mL⁻¹. En la Figura 10 se presenta una imagen de las cinco cepas bacterianas cultivadas.



Figura 10. Inóculos de cinco cepas de bacterias promotoras de crecimiento vegetal.
Fuente: Elaboración propia con imagen de Laboratorio de Microbiología FIQ-BUAP.

4.3.4.2 Muestreo y análisis de agua

El muestreo de agua de riego fue de tipo puntual y se realizó el día 25 de junio de 2019. En el Cuadro 11 se muestran las coordenadas geográficas de cada estación que fueron georreferenciadas, utilizando un GPS Garmin etrex 10. Se aplicaron las metodologías descritas en el proyecto de norma PROY-NMX-AA-003/1-SCFI-2008 (DOF, 2009) y en las especificaciones de Eaton, Clesceri, Rice, & Greenberg (2005). Los recipientes usados se enjuagaron repetidas veces con el agua a muestrear antes de obtenerlas.

Cuadro 11. Coordenadas geográficas de las estaciones de muestreo de agua.

Estación	Nombre referencial	Coordenada		Altura (m)
		Norte	Oeste	
1	Jagüey	18° 55' 44.5"	98° 21' 37.2"	1890
2	Central Hidroeléctrica Portezuelo I	18° 55' 31.9"	98° 20' 40.4"	1913
3	Canal de riego	18° 55' 58.6"	98° 21' 44.5"	1909

Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Los parámetros analizados en las tres muestras de agua se presentan en el Cuadro 12. Las muestras de agua se vertieron en recipientes de plástico etiquetados debidamente, según el parámetro a determinar y se les agregaron las sustancias para preservarlas.

Cuadro 12. Parámetros de análisis de las muestras de agua de riego.

Parámetro	Norma Mexicana	Método
Conductividad Eléctrica CE	NMX-AA-093-SCFI-2000	Conductimetría
Sólidos Totales ST	NMX-AA-034-SCFI-2001	Gravimétrico
Sólidos Suspendidos Totales SST	NMX-AA-034-SCFI-2000	Gravimétrico
Sólidos Disueltos Totales SDT	NMX-AA-034-SCFI-2001	Gravimétrico
Sólidos Sedimentables SS	NMX-AA-004-SCFI-2013	Método Imhoff
Cloruros	NMX-AA-073-SCFI-2001	Valoración por precipitación
Oxígeno Disuelto OD	NMX-AA-012-SCFI-2001	Método yodométrico
Grasas y aceites	NMX-AA-028-SCFI-2001	Extracción con Soxhlet con hexano
Dureza Total como CaCO ₃	N NMX-AA-072-SCFI-2000	Valoración complejométrica con EDTA ¹
Dureza al Calcio Ca ²⁺	N NMX-AA-072-SCFI-2000	Valoración complejométrica con EDTA
Dureza al Magnesio Mg ²⁺	N NMX-AA-072-SCFI-2001	Valoración complejométrica con EDTA
Alcalinidad	NMX-AA-036-SCFI-2001	Valoración ácido-base
Carbonatos CO ₃ ²⁻	NMX-AA-036-SCFI-2001	Valoración ácido-base
Bicarbonatos HCO ₃ ⁻	NMX-AA-036-SCFI-2001	Valoración ácido-base
Sulfatos SO ₄ ²⁻	NMX-AA-074-SCFI-1881	Espectrofotométrico
Nitrógeno total	NMX-AA-026-SCFI-2010	Kjeldahl
Nitrógeno amoniacal N-NH ₄ ⁺	NMX-AA-026-SCFI-2010	Kjeldahl
Fósforo Total P-PO ₄ ³⁻	PROY-NMX-AA-029/1-SCFI-2008	Espectrofotométrico
Cianuros	NMX-AA-058-SCFI-2001	Espectrofotométrico
Sodio Na ⁺	NMX-AA-051-SCFI-2001	Flamometría
Potasio K ⁺	NMX-AA-051-SCFI-2002	Flamometría

¹ ácido etilendiaminotetraacético (EDTA, por sus siglas en inglés). Fuente: Elaboración propia con información de la normatividad mexicana vigente para análisis de las muestras de agua de riego.

(Continuación Cuadro 12)

Parámetro	Norma Oficial Mexicana	Método
Conductividad Eléctrica CE	NMX-AA-093-SCFI-2000	Conductimetría
Cobre Cu	NMX-AA-051-SCFI-2001	Absorción Atómica
Cadmio Cd	NMX-AA-051-SCFI-2001	Absorción Atómica
Plomo Pb	NMX-AA-051-SCFI-2001	Absorción Atómica
Hierro Fe	NMX-AA-051-SCFI-2001	Absorción Atómica
Manganeso Mn	NMX-AA-051-SCFI-2001	Absorción Atómica
Cromo Cr	NMX-AA-051-SCFI-2001	Absorción Atómica
Zinc Zn	NMX-AA-051-SCFI-2000	Absorción Atómica
Níquel Ni	NMX-AA-051-SCFI-2001	Absorción Atómica
Coliformes totales	NMX-AA- 042-SCFI-2015	NMP·100 mL ⁻¹
Coliformes fecales	NMX-AA- 042-SCFI-2015	NMP·100 mL ⁻¹

Fuente: Elaboración propia con información de la normatividad mexicana vigente para análisis de las muestras de agua de riego.

Se determinaron en el sitio de muestreo la materia flotante, temperatura, conductividad eléctrica, pH y se fijó el oxígeno disuelto en recipientes Winkler. Tanto la temperatura, pH, y conductividad eléctrica se determinaron con un equipo portátil CONDUCTRONIC PC18. Las muestras no preservadas con reactivos se colocaron en hieleras a una temperatura de 4 °C para ser transportadas a laboratorio para su análisis. Se comparó con los límites máximos permisibles establecidos en las normatividades de México (DOF, 1997), Canadá (Environment Canada, 2000) y España (BOE, 2002) para determinar si el agua se consideraba contaminada por CN⁻, Cu, Cd, Pb, Mn, Cr, Zn y Ni.

4.3.4.3 Muestreo y análisis de suelo

En campo, las cuatro parcelas muestreadas correspondieron a plantaciones de *Opuntia ficus-indica* cultivar Atlixco irrigadas con aguas residuales no tratadas provenientes del río Atoyac, cuyas coordenadas se presentan en el Cuadro 13. Las coordenadas de las parcelas experimentales corresponden a las de las parcelas Estacas (Parcela 1) y Terciopelo (Parcela 2).

Cuadro 13. Coordenadas geográficas de las estaciones de muestreo de suelo.

Estación	Nombre referencial	Coordenada Norte	Coordenada Oeste	Altura (m)
1	Canal	18° 55' 49.289"	98° 21' 46.004"	1899.4
2	Estacas	18° 55' 18.116"	98° 21' 49.316"	1868.4
3	Terciopelo	18° 55' 28.909"	98° 21' 49.936"	1878.4
4	Vara Seca	18° 55' 37.416"	98° 21' 57.006"	1888.2

Fuente: Elaboración propia con información de campo.

El muestreo de suelo se realizó con base en la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002) de acuerdo con el procedimiento AS-01, obtención y preparación de la muestra. El muestreo se realizó a una profundidad de 0 a 30 cm, de 30 a 60 cm sólo para la determinación de N-NO₃ y de 60 a 90 cm para determinar salinidad. Se tomaron submuestras de forma sistemática y se vaciaron en una cubeta de plástico. Para extraer la muestra compuesta se realizó el método de cuarteos diagonales. Se vació el contenido de la cubeta plástica sobre un plástico limpio mezclando cuidadosamente para homogeneizar, y se formó un círculo que se divide en cuatro cuadrantes, se eliminaron los cuadrantes opuestos (de color blanco en la Figura 11) y los otros dos se mezclaron. Esto se repitió hasta reducir la muestra a 1 kg. Durante el procedimiento se retiraron los materiales orgánicos, grava y piedras. El suelo sobrante se reserva seco. Se emplearon bolsas de polietileno limpias para empacar las muestras.

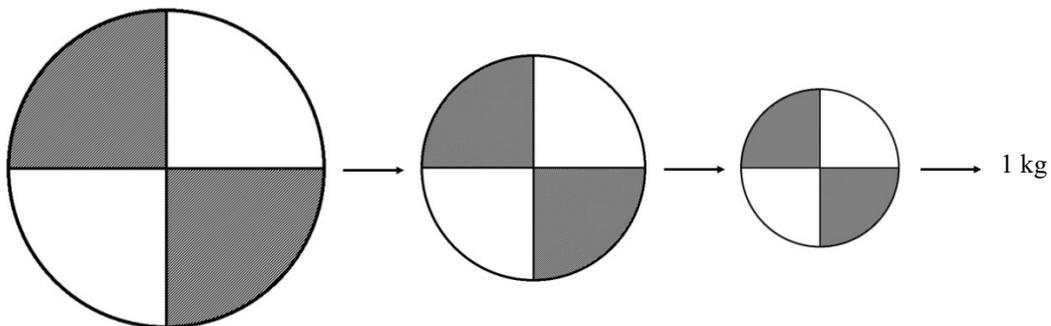


Figura 11. Método de cuarteos diagonales para la generación de una muestra compuesta de suelo.

Fuente: Elaboración propia.

Se usaron los procedimientos analíticos autorizados por la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 publicada en el Diario Oficial de la Federación el 31 de diciembre de 2002 (DOF, 2002). La interpretación de las características físicas y químicas del suelo muestreado en la región de estudio se realizó mediante comparación con los resultados del suelo testigo, proveniente de la zona menos perturbada y cercana a la región de estudio.

La interpretación de las características físicas y químicas del suelo muestreado en las parcelas experimentales se realizó mediante comparación con los resultados del suelo testigo, el correspondiente a las unidades experimentales sin inoculación de Bacterias Promotoras de Crecimiento Vegetal (BPCV).

Se comparó con los límites máximos permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM147-SEMARNAT/SSA1-2004 (DOF, 2007), canadiense (CCME, 2007) y de la Comunidad Europea (UE, 2015a) para determinar si el suelo se consideraba contaminado por Cu, Cd, Pb, Cr, Zn, Ni, Co y Ba, con base en las concentraciones detectadas en las muestras. Los indicadores evaluados se presentan en el Cuadro 14.

Cuadro 14. Parámetros para determinar la calidad del suelo.

Parámetro	Método	Parámetro	Método	Parámetro	Método
pH	AS-02*	PSI	AS-21*	CE	AS-18*
M.O.	AS-07*	CO ₃	AS-20*	DR	
N Total	AS-25*	HCO ₃	AS-20*	Humedad	
Ca	AS-12*	Cl	AS-20*	Porosidad	
Mg	AS-12*	SO ₄	AS-20*	PSB	AS-21*
Na	AS-12*	Fe	EPA 3051	Cd	EPA 3051
K	AS-12*	Cu	EPA 3051	Ni	EPA 3051
CIC	AS-12*	Mn	EPA 3051	Cr	EPA 3051
P	Bray-1	Zn	EPA 3051	Co	EPA 3051
DA	Probeta	Pb	EPA 3051	Ba	EPA 3051

* NOM-021-SEMARNAT-2000. Fuente: Elaboración propia con información de DOF (2002) y EPA (1998).

Sobre el experimento en invernadero, se muestreó y se analizaron los parámetros físicos y químicos relativos a la fertilidad y al contenido de elementos potencialmente tóxicos, de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002), con el mismo procedimiento aplicado en las parcelas en campo.

4.3.4.4 Muestreo del material vegetal

Se llevaron a cabo dos mediciones del número de cladodios emergidos y del grosor (mm) de cada cladodio de las plantas de la parcela útil, desde la base de cada cladodio o raqueta con un vernier digital Truper, modelo 14388. La primera medición se llevó a cabo el 26 de febrero de 2020 y la segunda medición el 26 de marzo de 2020. Enseguida, los nopales se cosecharon durante el transcurso de la mañana haciendo sólo un corte en la base del nopal. Las muestras se

transportaron en rejillas plásticas al laboratorio para su secado en una estufa Riossa® con aire forzado por 48 h a 70 °C. Se pulverizaron 150 g por muestra en mortero de porcelana y se determinaron por espectrofotometría de absorción atómica las concentraciones de los elementos esenciales Na, K, Fe, Cu, Mn, Zn, Ca y Mg y de un elemento no esencial (EPT), Pb, sobre las muestras que previamente habían pasado por el proceso de digestión conforme al método EPA 3052 (EPA, 1996).

4.4 Técnicas para el análisis de la información

4.4.1 Datos de la encuesta

Los datos obtenidos en las encuestas se analizaron en el programa Statistical Package for Social Science (SPSS) versión 25 y Microsoft® Excel. El análisis descriptivo consistió en la obtención de las medidas de tendencia Central y de dispersión. El análisis inferencial consistió en la aplicación de la prueba exacta de Fisher ($p \leq 0.05$).

4.4.2 Datos del material vegetal

Los datos experimentales para cada cepa se presentan por quintuplicado en términos de la media y el error estándar de grosor de raquetas, número de raquetas y brotes, así como concentración de los elementos potencialmente tóxicos en raquetas cosechables como nopal verdura por planta. La evaluación estadística de dichas variables se realizó mediante análisis de varianza (ANDEVA) multifactorial con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). El análisis estadístico permite comparar las medias y determinar las diferencias significativas del efecto de las cepas. El análisis estadístico se realizó con el programa InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2014).

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Aspectos sociodemográficos

Se identificó que de los 48 productores de nopal que irrigan con aguas provenientes del Río Atoyac en las comunidades de estudio, 54.2 % son hombres, mientras que 45.8 % son mujeres, cuya edad promedio es de 40 años. La mayoría de los productores tiene entre 25 a 29 años (16.7 %) y entre 35 a 39 años (16.7 %); asimismo, destaca que 10.4 % de los productores varones encuestados tengan entre 45 y 49 años (Cuadro 15).

Cuadro 15. Estructura por edad y sexo de los productores de nopal en la zona de estudio.

Estructura por edad y sexo	Hombre		Mujer		Total	
	fi	%	fi	%	fi	%
Población de 15 a 19 años	0	0.0	1	2.1	1	2.1
Población de 20 a 24 años	2	4.2	2	4.2	4	8.3
Población de 25 a 29 años	4	8.3	4	8.3	8	16.7
Población de 30 a 34 años	3	6.3	4	8.3	7	14.6
Población de 35 a 39 años	4	8.3	4	8.3	8	16.7
Población de 40 a 44 años	0	0.0	1	2.1	1	2.1
Población de 45 a 49 años	5	10.4	1	2.1	6	12.5
Población de 50 a 54 años	2	4.2	2	4.2	4	8.3
Población de 55 a 59 años	2	4.2	1	2.1	3	6.3
Población de 60 a 64 años	2	4.2	2	4.2	4	8.3
Población de 65 a 69 años	1	2.1	0	0.0	1	2.1
Población de 70 a 74 años	0	0.0	0	0.0	0	0.0
Población de 75 a 79 años	1	2.1	0	0.0	1	2.1
Total	26	54.2	22	45.8	48	100.0

Fuente: Elaboración propia con información de campo (N = 48).

Al respecto, en Hidalgo, México, se identificó que la edad promedio de los productores de nopal era de 61.4 años, edad que rebasa por cuatro años la edad promedio en ese estado. En la Alcaldía de Milpa Alta, el Padrón de Beneficiarios del Programa Integral de Apoyo a los Productores de Nopal, PIAPRON (2022) se integró por 5,560 personas, 47.8 % hombres y 52.2 % mujeres, con una edad entre 17 y 97 años cuya media fue de 46.41 años, edad media de 47 años en hombres y 46 años en mujeres.

Según la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA, 2019), de los productores mexicanos 83.02 % son hombres, mientras que 16.98 % son mujeres, de los que cuatro de cada 10 productores agropecuarios tienen entre 46 y 60 años. De lo anterior, destaca que los productores de nopal de

la zona de estudio son una población más joven y paritaria en cuanto a la participación de hombres y mujeres que el promedio de productores agropecuarios a nivel nacional.

En el Cuadro 16 se presentan los datos descriptivos sociodemográficos de los productores que usan en la agricultura las aguas residuales no tratadas provenientes del río Atoyac.

Cuadro 16. Datos descriptivos sociodemográficos.

Variables	Hombres		Mujeres		Total/media
Sexo	26	(54.2 %)	22	(45.8 %)	48
Edad (media)					
Mínima	22		19		40.27
Máxima	76		64		
Nivel de estudios					
Primaria	16	(33.3 %)	10	(20.8 %)	26
Secundaria	7	(14.6 %)	10	(20.8 %)	17
Bachillerato	2	(4.2 %)	0	(0.0 %)	2
Licenciatura	1	(2.1 %)	1	(2.1 %)	2
Posgrado	0	(0.0 %)	0	(0.0 %)	0
Otro	0	(0.0 %)	1	(2.1 %)	1
Asociación					
No pertenece	21	(43.8 %)	17	(35.4 %)	38
Grupo San Pablo Ahuatempan	0	(0.0 %)	1	(2.1 %)	1
Asociación Mercado de Santa Rita	3	(6.3 %)	0	(0.0 %)	3
Asociación de Nopaleros	0	(0.0 %)	1	(2.1 %)	1
Asociación de Flores Villa de Cancún	1	(2.1 %)	0	(0.0 %)	1
Otra	1	(2.1 %)	3	(6.3 %)	4
Integrantes de familia					
De 1 a 5	15	(31.3 %)	10	(20.8 %)	25
De 6 a 10	10	(20.8 %)	8	(16.7 %)	18
De 11 a 15	0	(0.0 %)	4	(8.3 %)	4
Cantidad de hijos					
De 0 a 4	17	(35.4 %)	18	(37.5 %)	35
De 5 a 8	7	(14.6 %)	3	(6.3 %)	10
De 9 a 12	1	(2.1 %)	1	(2.1 %)	2
Familiar cercano migrante					
Sí	12	(25.0 %)	11	(22.9 %)	23
No	13	(27.1 %)	11	(22.9 %)	24

Fuente: Elaboración propia con información de campo (N = 48).

La mayoría de los productores, 54.1 %, cuenta solo con el nivel de estudios de primaria (Cuadro 16), sucediendo a nivel nacional una situación semejante con 57.1 % de productores que tienen primaria; sin embargo, los productores de la zona de estudio cuentan con un mayor porcentaje de productores con secundaria (35.4 %) que el nacional de 16.8 % (ENA, 2019). En la zona de estudio, ningún productor de nopal indicó no tener estudios. Una referencia con respecto a productores de nopal es el municipio Pinos, Zacatecas, donde 63 % de los productores habían cursado la secundaria y 37 % la primaria (Mendoza-Orozco *et al.*, 2019), quienes también superaron la media nacional.

Sobre la asociación con otros productores de nopal, se halló que, en la zona de estudio, la mayoría no se asocia con otros productores (Cuadro 16), correspondiente con los estudios realizados en los Pinos, Zacatecas donde sólo 12 % mantenía relación con socios en la producción (Mendoza-Orozco, Morales-Flores, & Méndez-Gallegos, 2019). En Hidalgo, sin embargo, el Inter-American Institute for Cooperation on Agriculture (IICA, 2017) elaboró un estudio donde se reportaron nueve organizaciones de productores de tuna y seis organizaciones de productores de nopal verdura constituidas de forma legal o por “acuerdo de caballeros” que agrupan a cerca de 500 productores, quienes tiene en su mayoría vínculos con el Consejo Hidalguense de Nopal y Tuna, A. C. Este éxito en la asociación se vincula a la Ley de Desarrollo Rural Sustentable, del 7 de diciembre del 2001 y al plan rector instrumentado por la SAGARPA que incentivaron la conformación de asociaciones.

En cuanto a la situación familiar, la mayoría de los productores (72.9 %) reportaron tener de cero a cuatro hijos, mientras que sobre el número de integrantes de la familia 52 % reportó entre 1 a 5 integrantes, 37.5 % de 6 a 10 integrantes y 8.3 % reportaron tener entre 11 a 15 integrantes, siendo este último dato la respuesta de sólo mujeres (Cuadro 16). La estructura familiar tiene importancia para la sucesión de las actividades emprendidas a futuro sobre la cadena productiva de nopal. Se ha identificado que, en México, 98 % de las empresas son familiares (Marcelino-Aranda, Torres-Ramírez, Muñoz-Marcelino, & Camacho, 2020), por lo que plantear la conformación de empresas familiares y la incorporación de los productores de nopal y sus hijos a un proceso de formación empresarial rural como lo sugiere el IICA (2017), resulta factible. De acuerdo con Ayala-Mendivil, Ochoa-Jiménez, & Jacobo-Hernández (2017), es fructífero para la sociedad que se constituyan más familias y que los cónyuges perseveren manteniendo un

ambiente estable, ya que el emprendimiento familiar es fundamental para el crecimiento local y nacional al generar nuevas empresas en zonas económicas riesgosas que mantienen en fuerte y constante expansión la economía.

Se ha identificado que poco más de la mitad de los productores de nopal, con 52.08 %, no cuentan con ningún familiar migrante en el extranjero, mientras que 22.92 % cuentan con un hermano y 10.42 % con un primo en el extranjero (Cuadro 16). La mayoría de los familiares que son migrantes tienen parentesco de hermanos con el informante y pertenecen a la población económicamente activa.

5.2 Percepción de problemas en la zona de riego

Sobre la percepción de problemas en la zona de riego, los productores calificaron el desempleo, la falta de seguridad pública, la falta de sitios para atender la salud, la falta de servicios como transporte, conectividad, telefonía y caminos, la falta de fertilidad del suelo, así como la erosión del suelo, las plagas y la contaminación del agua.

Las medias de calificación en una escala de 1 a 4, donde 1 es nada grave, 2 es ligeramente grave, 3 es bastante grave y 4 muy grave fueron 1.96 tanto para falta de seguridad pública como para falta de sitios para atención de salud, 1.89 para el desempleo, 1.50 para falta de transporte, 1.81 para falta de conectividad y telefonía, 2.22 tanto para falta de caminos como para fertilidad del suelo, 1.85 para la erosión del suelo, 3.29 para plagas y 2.53 para contaminación del agua. De lo anterior, se determina que los problemas de plagas y de contaminación del agua son los más trascendentes de los enunciados para los productores de nopal de la zona de estudio, los cuales son problemas de manejo, cuyo origen tiene en parte relación con la débil regulación ambiental e inversión en los sectores de agricultura e industria contaminante (Freire-Vinueza, Meneses, & Cuesta, 2021). Al respecto, se presenta el Cuadro 17, donde se observa el número y porcentaje de productores que mencionaron percibir algún nivel de gravedad en las problemáticas mencionadas.

Cuadro 17. Percepción del nivel de gravedad de problemáticas.

Percepción falta de servicios básicos										
Variable	Nada grave		Ligeramente grave		Bastante grave		Muy grave		No contestó	
	fi	(%)	fi	(%)	fi	(%)	fi	(%)	fi	(%)
Seguridad pública	20	41.7	15	31.3	8	16.7	5	10.4	0	0.0
Sitios de salud	22	45.8	10	20.8	10	20.8	5	10.4	1	2.1
Percepción problemas de ocupación										
Desempleo	25	52.1	8	16.6	8	16.6	6	12.5	1	2.1
Percepción falta de servicios de comunicación										
Transporte	29	60.4	12	25.0	4	8.3	1	2.1	2	4.2
Conectividad y telefonía	26	54.2	9	18.8	7	14.6	5	10.4	1	2.1
Caminos	13	27.1	14	29.2	13	27.1	5	10.4	3	6.3
Percepción problemas agrícolas										
Erosión del suelo	21	43.8	16	33.3	6	12.5	4	8.3	1	2.1
Fertilidad del suelo	15	31.3	15	31.3	7	14.6	9	18.8	2	4.2
Plagas	0	0.0	8	16.7	18	37.5	22	45.8	0	0.0
Percepción problemas de contaminación										
Contaminación del agua	13	27.1	10	20.8	10	20.8	14	29.2	1	2.1

Fuente: Elaboración propia con información de campo (N = 48).

En cuanto a la baja fertilidad del suelo, mientras 31.3 % consideró que el problema era nada grave, 64.7 % le adjudicó cierto nivel de gravedad (31.3 % ligeramente grave, 14.6 % bastante grave y 18.8 % muy grave). En este sentido, resulta fundamental mejorar la composición del suelo con la incorporación de materiales orgánicos o la inoculación de microorganismos, para regular la concentración de nutrientes disponibles para los cultivos, sin cometer el error de recomendar mayor fertilización química, lo que contribuiría a la contaminación y acidificación de los suelos (FAO/UNEP, 2021).

Con relación a la erosión del suelo, mientras 43.8 % expresó que el problema era nada grave, 54.1 % opinó que percibía algún nivel de gravedad (33.3 % ligeramente grave, 12.5 % bastante grave y 8.3 % muy grave). De acuerdo con INEGI (2013) la erosión presente en las partes con mayor relieve de la zona de estudio es hídrica, la cual se debe al escurrimiento superficial y la falta de infiltración del agua en el suelo (Barbosa-Moreno, Fernández-Reynoso, Rubio-Granados, Sánchez-Cohen, & Contreras-Hinojosa, 2016).

Con relación a las plagas, mientras ninguno expresó que el problema era nada grave, 100 % opinó que percibía algún nivel de gravedad (16.7 % ligeramente grave, 37.5 % bastante grave y

45.8 % muy grave). Entre las plagas mencionadas por los productores están cochinilla, gusanito toro y picudo. El problema de las plagas está descrito en la teoría de la trofobiosis (Chaboussou, 1987), la que indica que la buena salud de la planta se asocia al equilibrio dinámico interno que involucra procesos metabólicos efectivos en función de su edad, manejo y adaptación al medio, mientras que procesos metabólicos deficientes vuelven disponibles los compuestos de los que se alimentan insectos, ácaros, nematodos o microorganismos (hongos o bacterias).

Con relación a la contaminación del agua (Figura 12), mientras 27.1 % expresó que el problema era nada grave, 70.8 % opinó que percibía algún nivel de gravedad (20.8 % ligeramente grave, 20.8 % bastante grave y 29.2 % muy grave). La falta de agua de buena calidad acorde al uso genera numerosos problemas, cuyas causas son socioeconómicas (rápido y desorganizado crecimiento poblacional, bajo Producto Interno Bruto e industrias contaminantes) y operativas, provenientes de instituciones estructuralmente débiles con mala planificación (Arreguin-Cortes *et al.*, 2020).

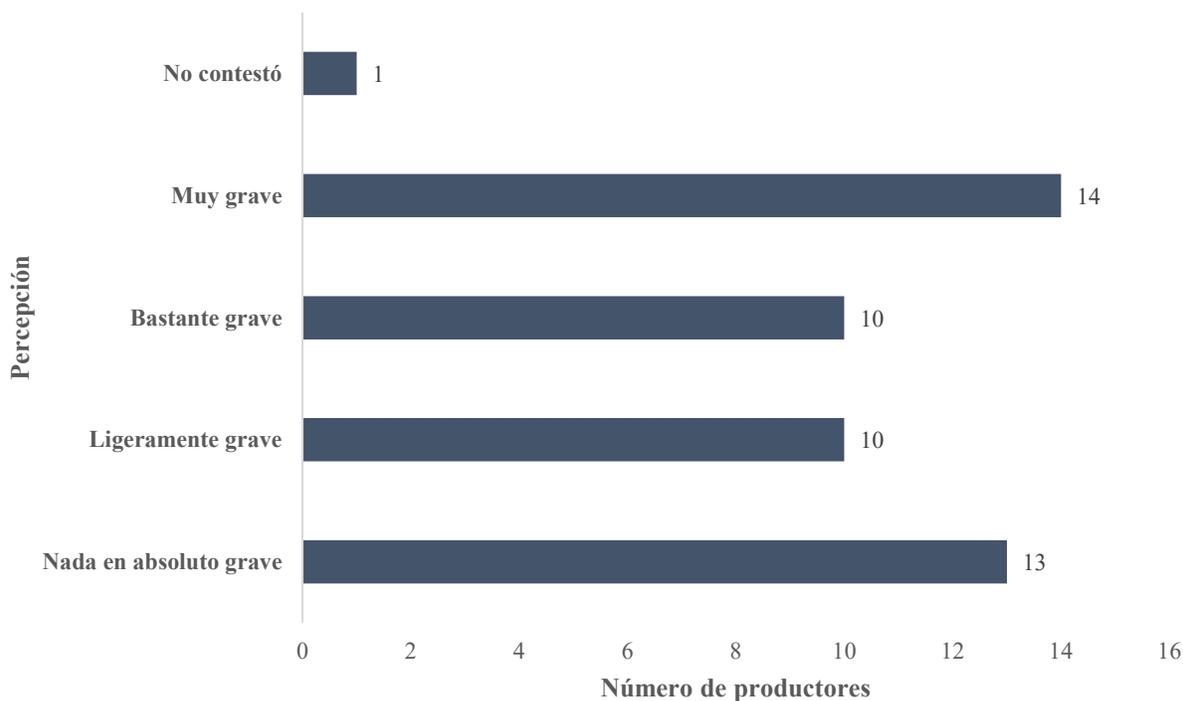


Figura 12. Percepción de los productores sobre la contaminación del agua de riego.
Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Del total de productores de nopal verdura, consideraron entre los principales problemas que enfrentan 81.3 % a las plagas y enfermedades, 75.0 % a los precios bajos del nopal verdura, 35.4 % al manejo de las huertas, 41.7 % a la situación climática, 25.0 % a la comercialización, 16.7 % a la estacionalidad, 18.8 % a la calidad del nopal y 6.3 % a otros problemas. Otros problemas mencionados por los productores fueron los incrementos anuales a los precios de los agroquímicos, la variación de precio de venta del nopal durante el año, la gran cantidad de basura en el ambiente, así como las dificultades para vender nopal y adquirir abono durante la pandemia de COVID-19.

5.3 Percepción del riesgo

De acuerdo con la ENA (2019), a nivel nacional, las unidades de producción con superficie de riego correspondían al 23.33 % del total, de las que 63.59 % de los productores reportaron usar riego por gravedad o rodado con canales de tierra, mencionando 29.06 % usa agua proveniente de una presa, 22.99 % usa agua proveniente de un río y 3.07 % usa agua de jagüey. Sobre el tipo de agua solo 6.6 % reportó usar agua negra o residual, como sucede en la zona de estudio.

Con relación a la opinión sobre el grado de contaminación del agua que fluye por los canales de riego cerca de la Central Hidroeléctrica Portezuelo I, mientras 12.5 % expresó que no estaban contaminados, 87.5 % opinó que percibía algún grado de contaminación (33.3 % ligeramente contaminados, 18.8 % bastante contaminados y 35.4 % muy contaminados). Respecto a la opinión sobre el grado de contaminación de los canales de riego cerca del Jagüey, mientras el 10.4 % expresó que estaban nada contaminados, el 87.5 % opinó que percibía algún grado de contaminación (47.9 % ligeramente contaminados, 20.8 % bastante contaminados y 18.8 % muy contaminados). Por su parte, acerca de la opinión sobre el grado de contaminación de los canales de riego cerca de su parcela, mientras 20.8 % expresó que estaban nada contaminados, 77.1 % opinó que percibía algún grado de contaminación (52.1 % ligeramente contaminados, 12.5 % bastante contaminados y 12.5 % muy contaminados). En la Figura 13 se presenta un gráfico comparativo de la percepción de los productores sobre el grado de contaminación en el canal general, en el jagüey y en el canal que irriga la parcela del productor encuestado.

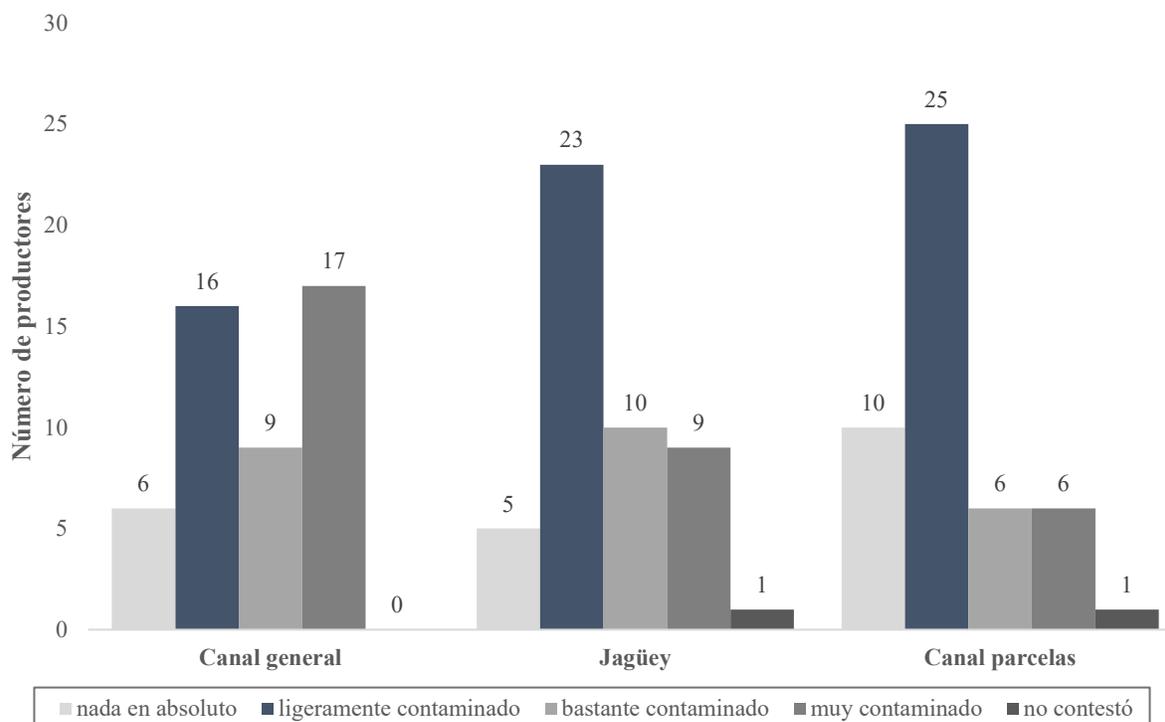


Figura 13. Percepción sobre el grado de contaminación del agua de riego.

Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Las medias de calificación en una escala de 1 a 4, donde 1 es nada contaminados, 2 es ligeramente contaminados, 3 es bastante contaminados y 4 muy contaminados fueron 2.77 para el grado de contaminación de los canales de riego cerca de la Central Hidroeléctrica Portezuelo I, 2.49 para el grado de contaminación de los canales de riego cerca del Jagüey y 2.17 para el grado de contaminación de los canales de riego cerca de su parcela.

Conforme a la Prueba Exacta de Fisher, se presentó asociación estadísticamente significativa $p \leq 0.05$ entre la antigüedad y la percepción del grado de contaminación del agua de riego cerca del canal general próximo al Jagüey con $p = 0.047$ ($p \leq 0.05$) y de los canales secundarios (después del jagüey) que conducen al agua a las parcelas con $p = 0.043$, $p \leq 0.05$ (Cuadro 18), donde a mayor antigüedad la percepción de contaminación fue mayor, pero no se presentó asociación sobre la percepción de la contaminación en el canal general cerca de la Central Hidroeléctrica Portezuelo I, donde sin distinción de antigüedad, opinaban que había un cierto grado de contaminación.

Cuadro 18. Análisis de la relación entre antigüedad y percepción sobre la afectación a la salud por contaminación del agua de riego.

Lugar	Percepción grado de contaminación del agua de riego	Antigüedad (años dedicándose a la agricultura)								Total	Prueba Exacta de Fisher	p-valor
		Menos de 10 años		Entre 10 y 15 años		De 15 a 20 años		Más de 20 años				
		fi	%	fi	%	fi	%	fi	%			
Canal general cerca de Central Hidroeléctrica Portezuelo I	Nada contaminado	4	66.7	0	0.0	0	0.0	2	33.3	6	9.265	0.746
	Ligeramente contaminado	5	31.3	1	6.3	1	6.3	9	56.3	16		
	Bastante contaminado	3	33.3	2	22.2	1	11.1	3	33.3	9		
	Muy contaminado	4	23.5	4	23.5	1	5.9	7	41.2	17		
Canal general cerca de Jagüey	Nada contaminado	4	80.0	0	0.0	0	0.0	1	20.0	5	17.659	0.047*
	Ligeramente contaminado	9	39.1	1	4.3	3	13.0	10	43.5	23		
	Bastante contaminado	2	20.0	2	20.0	0	0.0	6	60.0	10		
	Muy contaminado	1	11.1	4	44.4	0	0.0	3	33.3	9		
Canales secundarios	Nada contaminado	8	80.0	0	0.0	0	0.0	2	20.0	10	17.936	0.043*
	Ligeramente contaminado	6	24.0	3	12.0	3	12.0	13	52.0	25		
	Bastante contaminado	1	16.7	1	16.7	0	0.0	4	66.7	6		
	Muy contaminado	1	16.7	2	33.3	0	0.0	2	33.3	6		

* Hay asociación estadísticamente significativa $p \leq 0.05$ de acuerdo con la Prueba Exacta de Fisher. Fuente: Elaboración propia con información de campo (N = 48).

En un estudio realizado en comunidades ubicadas en las márgenes del Río Tlapaneco (Bustamante-González, Galindo-De Jesús, Jaramillo-Villanueva, & Vargas-López, 2016), se identificó que los habitantes de las comunidades localizadas más cerca de las descargas de aguas residuales son las que perciben prioritariamente el problema de la contaminación. Mientras tanto, Faviel-Cortez, Infante-Mata, & Molina-Rosales (2019), plantean que, de acuerdo con la opinión de los entrevistados en comunidades ubicadas en el área natural protegida La Encrucijada, Chiapas, la percepción de calidad del agua de las diferentes fuentes determina el uso que se les da. De lo anterior, podría determinarse que, aunque los habitantes de la zona de estudio perciben cierto nivel de gravedad sobre la contaminación del agua, la consideran aún funcional y

sumamente necesaria para el uso agrícola, ya que de su disponibilidad depende el éxito de los ciclos agrícolas y la obtención de las cosechas.

La percepción de los productores sobre las características o medio de identificación de la contaminación en el agua que fluye por el canal general, los canales secundarios y el agua en la parcela se manifiesta 16.7 % por ardor en los ojos, 12.5 % por dolor y/o resequead de garganta, 60.4 % por olor indeseable, 68.8 % porque el agua es menos transparente o tiene color, 12.5 % porque lo escucha en los medios de comunicación, 8.3 % porque lo dicen las autoridades, 14.6 % porque lo dicen otras personas y 4.2 % por la presencia de basura en los canales y por pudrición de cultivos, como en el caso del nopal que se pudre más fácilmente durante el almacenaje (Figura 14).

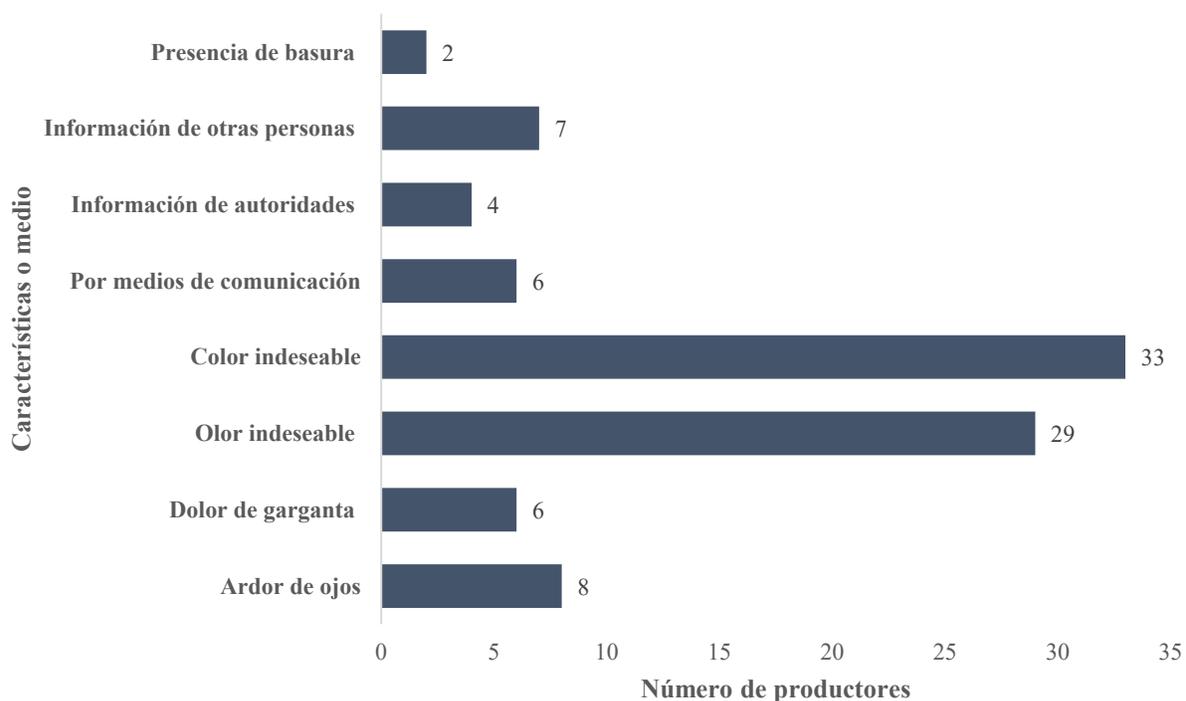


Figura 14. Características o medio por el que percibe que el agua de riego está contaminada.

Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Se halló asociación entre la percepción sobre el grado contaminación cerca de la Central Hidroeléctrica Portezuelo I y la contaminación por olor indeseable, con lo que se obtuvo un valor de la prueba exacta de Fisher de 0.011, con $p \leq 0.05$ (Cuadro 19), lo que indica que hay una asociación estadísticamente significativa entre la percepción de contaminación cerca de la Central Hidroeléctrica Portezuelo I y la percepción de contaminación por olor indeseable.

Jacobo-García (2018) identificó que los entrevistados en la Comunidad de Paso Blanco Jesús María, Aguascalientes, adjudican los malos olores del río Chicalote a los desechos sólidos arrojados y a las descargas de agua residual y mencionaron a las enfermedades de la piel, alergias y diarreas como problemas producidos por la contaminación del agua. En el mismo estudio, el mal olor fue un indicador de riesgo para el 50 % de los hogares entrevistados y para todos los entrevistados el agua generaba un mal olor, siendo los habitantes que viven más cerca del río quienes comentaron con mayor detalle cómo cambia el olor a lo largo del día.

Cuadro 19. Análisis de la relación entre percepción sobre el grado contaminación cerca de la Central Hidroeléctrica Portezuelo I y de la contaminación por olor indeseable.

Grado contaminación cerca C. Hidroeléctrica Portezuelo I	Percibe contaminación por olor indeseable				Total	Prueba Exacta de Fisher	p-valor
	No		Sí				
	fi	%	fi	%			
Nada	5	83.3	1	16.7	6		
Ligeramente contaminado	9	56.3	7	43.8	16		
Bastante contaminado	2	22.2	7	77.8	9	10.724	0.011
Muy contaminado	3	17.6	14	82.4	17		
Total	19	39.6	29	60.4	48		

Fuente: Elaboración propia con información de campo (N = 48).

5.3.1 Afectación del agua residual al suelo

Los productores opinan que el agua de riego afecta al suelo, al observar los siguientes aspectos (Figura 15): 47.9 % señalan que se forma una costra blanca en el suelo, 58.3 % se pone color negro, 16.7 % se pone verde, 10.4 % se produce menos cosecha, 25.0 % se requiere más fertilizante, 27.1 % se requiere mayor dosis de fungicida, 27.1 % se requiere mayor dosis de insecticida, 18.8 % se requiere mayor dosis de herbicida, 2.1 % se endurece o se compacta, 16.7 % tiene mal olor y 4.2 % por otras razones. Además, comentaron que se dan cuenta que el agua de riego afecta al suelo porque se riega con aguas negras; es decir, contaminadas o residuales, pero que se fortalece con abono de estiércol o fumigación. Un 14.6 % comentó que no había notado afectaciones al suelo. De acuerdo con la FAO/UNEP (2021), la contaminación del suelo en Latinoamérica y el Caribe se debe principalmente a la agricultura, debido a la aplicación excesiva de agroquímicos, al riego con aguas residuales sin tratar o aguas contaminadas superficiales o subterráneas, y al uso de estiércol y purines no compostados como fertilizantes.

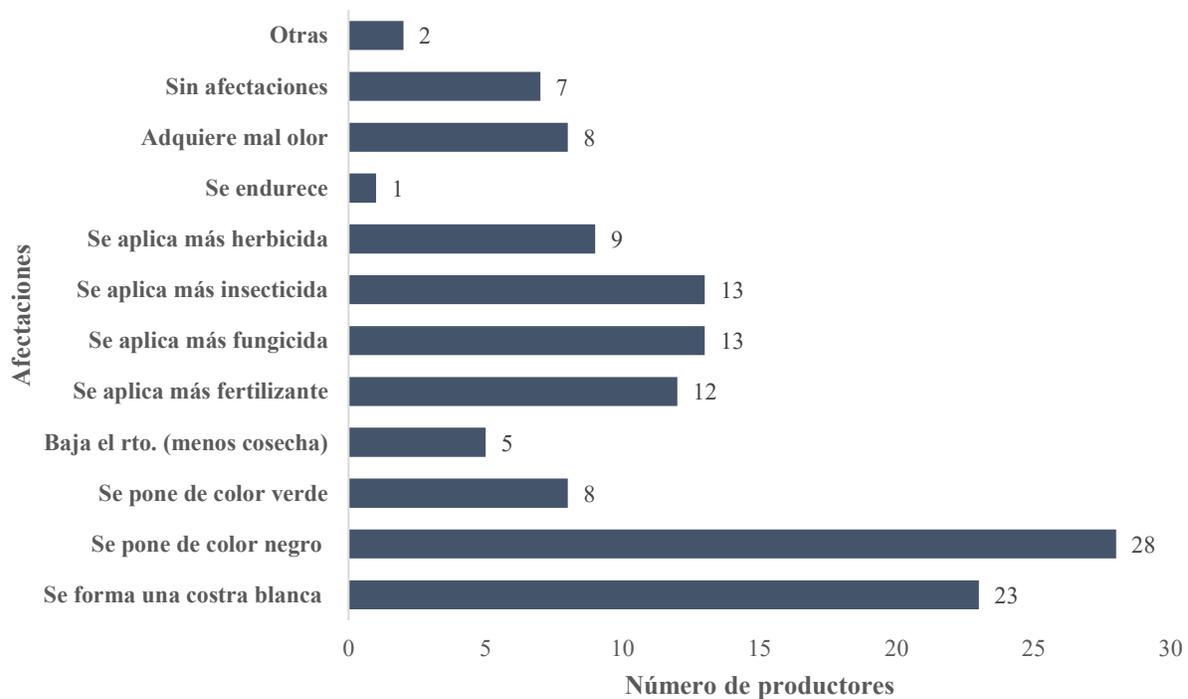


Figura 15. Características o medio por el que percibe que el agua de riego ha afectado al suelo.

Fuente: Elaboración propia con información de campo.

En general, consideran que el riego con aguas negras afecta al suelo en forma negativa y, para fortalecerlo y disminuir las afectaciones, realizan las siguientes prácticas agrícolas: 2.1 % esparcen cal y la revuelven con la tierra, 6.3 % aplican más insecticidas a las plantas y fertilizantes químicos, 8.3 % fortalecen el suelo con abonos orgánicos, 2.1 % mantienen limpio de residuos sólidos (Figura 16). Un 62.5 % mencionaron que no realizaban alguna práctica.

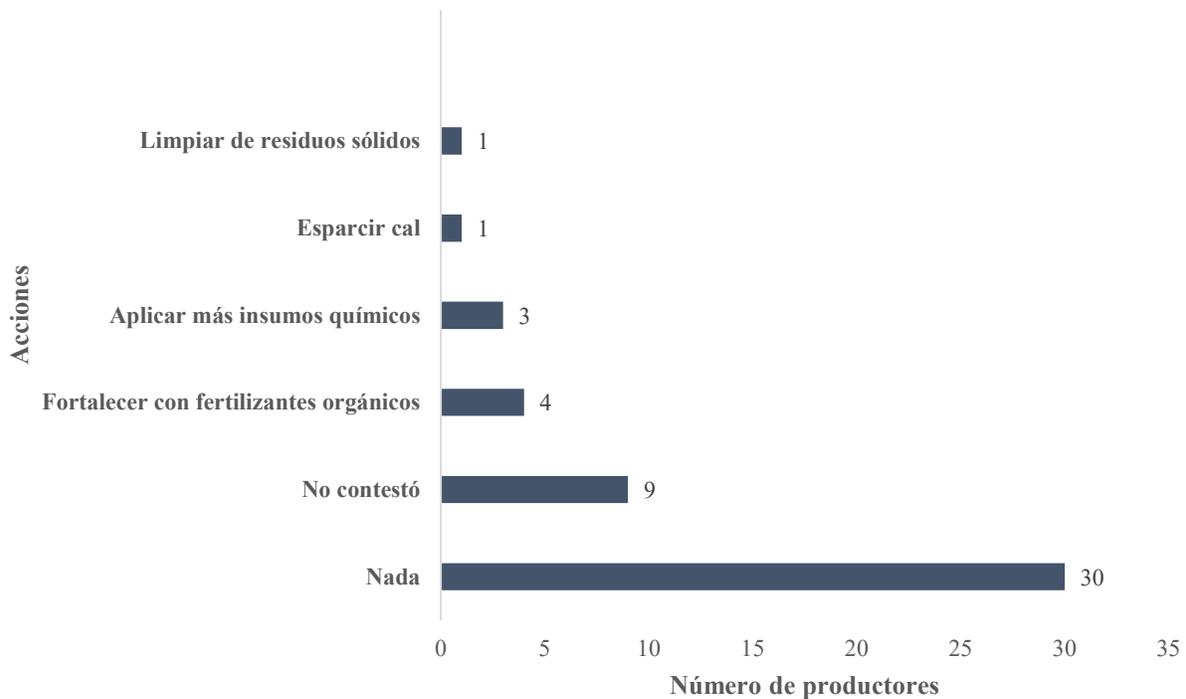


Figura 16. Acciones para para disminuir las afectaciones por contaminación de agua de riego.
 Fuente: Elaboración propia con información de campo.

5.3.2 Afectación del agua residual al nopal

Los productores opinaron que el agua de riego había afectado al nopal, siempre con 4.2 %, constantemente con 8.3 %, a veces con 6.3 % y nunca con 60.4 % del total de ellos. Asimismo, opinaron que la época en que le afecta más la calidad del agua de riego a la cosecha de nopal es todo el año con 2.1 %, en la época de lluvia con 16.7 %, en la época de seca con 6.3 % y en ninguna época con 31.3 %. La media de opinión en una escala de 1 a 4, donde 1 es nunca, 2 es a veces, 3 es constantemente y 4 siempre, fue de 1.45 sobre el grado de afectación del agua de riego al nopal.

Los productores opinaron que los meses en que le afecta más la calidad del agua de riego a la cosecha de nopal son enero con 2.1 %, febrero con 4.2 %, marzo con 8.3 %, abril con 22.9 %, mayo con 10.4 %, junio con 8.3 %, julio con 18.8 %, agosto con 14.6 %, septiembre con 4.2 % y octubre con 2.1 %. Ninguno de los productores comentó que la calidad del agua de riego afectara a la cosecha de nopal en los meses de noviembre y diciembre, mientras que un tercio de los productores (33.3 %) comentó que en ningún mes la calidad del agua de riego afecta a la cosecha de nopal.

Los productores mencionaron que notan las afectaciones del agua de riego al nopal porque las plantas se marchitan (6.3 %), se pudren (25.0 %), tienen plaga de hongos con mayor facilidad (10.4 %), tienen plaga de insectos con mayor facilidad (12.5 %) y nace más maleza (arvenses) a su alrededor (4.2 %). Un 10.4 % de los productores mencionaron que lo notaban de otras formas; 45.8 % de los productores mencionaron que no habían notado afectaciones al nopal a causa del agua de riego (Figura 17).

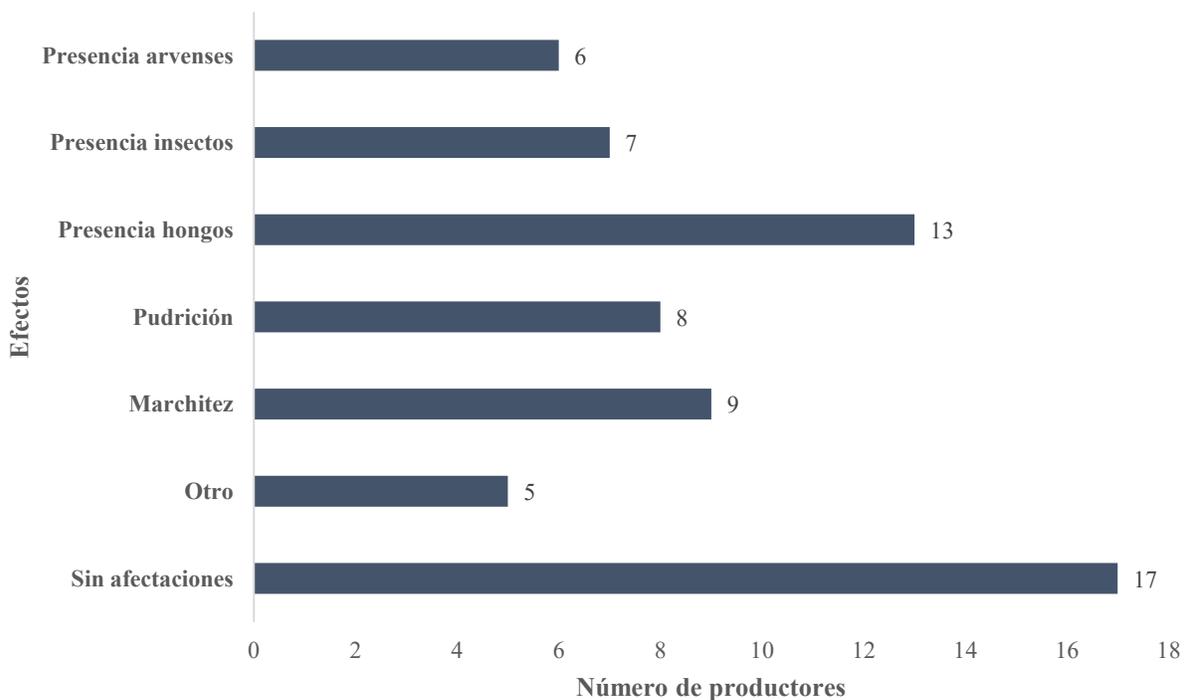


Figura 17. Percepción sobre afectaciones del agua de riego a cultivos.

Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Las actividades que los productores hacen para disminuir las afectaciones al nopal causadas por el agua de riego son regar solo cuando se necesita (6.3 %), poner abono y plaguicidas para disminuir plagas (16.7 %), mantener limpio de maleza (2.1 %) y retirar las pencas de nopal enfermas para no afectar a las sanas (2.1 %). Un 56.3 % mencionó que nada hacían para disminuir las afectaciones al nopal causadas por el agua de riego porque afirmaron que no había afectación. Corrales-Ramírez, Sánchez-Leal, & Quimbayo-Salamanca (2018), recomiendan implementar campañas educativas con los productores para evitar percances en la salud pública, así como diseñar normatividad relativa al tema e implementarla de manera eficaz. En este sentido, sería factible contemplar límites máximos permisibles de Unidades Formadoras de

Colonias por unidad de volumen (UFC·mL⁻¹), sobre los microorganismos fitopatógenos más comunes para evaluar agua de uso agrícola.

5.3.3 Afectación del agua residual a otros cultivos

De los productores, 72.9 % habían notado mejoras en el crecimiento de los cultivos por el agua de riego, mientras que 6.3 % mencionó que el crecimiento había sido normal y 8.3 % mencionó que ninguna mejora había habido; 27.1 % de los productores notaron que el agua de riego había afectado a los cultivos, siendo que 58.3 % consideraron que no habían notado afectaciones. 14.6 % han visto afectaciones a hortalizas como cebolla, tomate, rábanos y a flores como girasoles, noras y margaritones, mientras que 2.1 % opinaron que si bien, aumenta la producción, tiene mejor sabor el nopal de temporal, junto al que crecen más arvenses.

Los productores habían notado que el agua de riego les ha llegado a afectar a los cultivos porque se marchitan (18.8 %), se pudren (16.7 %), tienen plaga de hongos con mayor facilidad (27.1 %), tienen plaga de insectos con mayor facilidad (14.6 %), nace más maleza (arvenses) a su alrededor (12.5 %) y otro (10.4 %). Un 35.4 % no habían notado afectaciones a los cultivos.

De acuerdo con Corrales-Ramírez *et al.* (2018), las formas de irrigación y el riego con aguas contaminadas microbiológicamente, son factores importantes en la diseminación de fitopatógenos como *Aspergillus fumigatus*, *Aspergillus flavus*., *Mucor spp.*, *Rhizopus spp.*, *Penicillium spp.*, *Fusarium spp.*, *E. cloacae* y *B.cereus*, microorganismos que provocan marchitez foliar y pudrición de tallos y frutos, mientras que también pueden ser patógenos oportunistas para humanos y provocar enfermedades por contacto directo o indirecto.

Los productores expresaron que los cultivos que han visto afectados con el agua de riego son tomate (6.3 %), cilantro (8.3 %), cebolla (2.1 %), perejil (2.1 %), aguacate (2.1 %), girasol (4.2 %), flor (12.5 %), ninguna de porte alto, excepto el aguacate y el girasol, por lo que el contacto directo con el agua en la zona foliar podría incidir con mayor facilidad, produciendo enfermedades (Corrales-Ramírez *et al.*, 2018). Un tercio de los productores (33.3 %), consideraron que ningún cultivo habían visto que fuese afectado con el agua de riego, mientras que 12.5 % de los productores consideraron que era incierto. En la Figura 18 se observa el número de productores que indicaron afectaciones a los cultivos por el agua de riego.

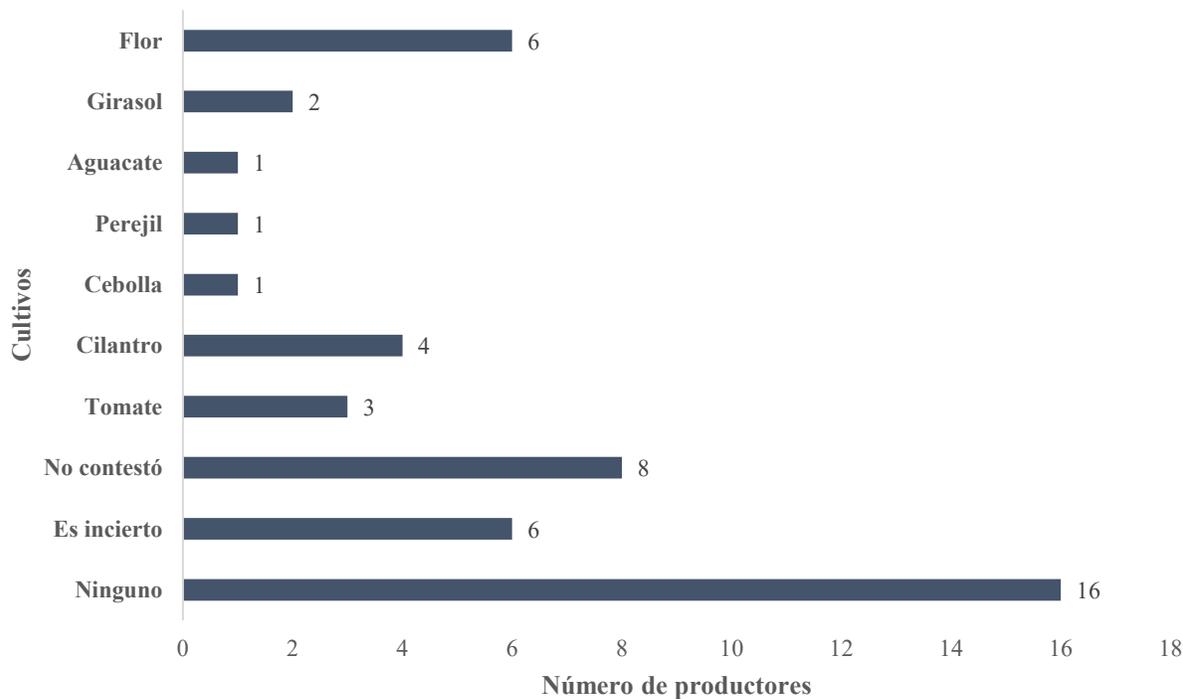


Figura 18. Percepción sobre cultivos afectados con el agua de riego.

Fuente: Elaboración propia con información de campo.

De los productores, 27.1 % expresaron que para disminuir las afectaciones a los cultivos causados por el agua de riego se aplican pesticidas cuando lo requieren y para suspender riesgos, mientras que 47.9 % mencionó que nada hacían para disminuir las afectaciones a los cultivos causadas por el agua de riego porque afirmaron que no había afectación.

5.3.4 Afectación del agua residual a la salud de los productores

Los productores mencionaron que la contaminación del agua afecta la salud de los habitantes de la zona de riego por daños en la salud de la piel (18.8 %); por problemas respiratorios, en ojos y dolor de cabeza (10.4 %); por problemas al sistema inmune donde bajan las defensas del organismo, incrementa la posibilidad de enfermarse, afecta el crecimiento, debilita el cuerpo y causa desgaste (10.4 %); efectos psicológicos (2.1 %); enfermedades en general (2.1 %); efectos en la vida diaria que impiden realizar actividades al aire libre (12.5 %), muerte (0.0 %), no sabe (12.5 %), no afecta a la salud (43.8 %) y por otras razones (12.5 %). Al respecto, una de las conclusiones de Jacobo-García (2018), en su estudio sobre el efecto de las aguas residuales en la comunidad Paso Blanco, Jesús María, Aguascalientes, fue que “quienes consideran que viven en zona de riego creen que su salud es más vulnerable con respecto de quienes no consideran que

viven en zona de riego”. En este caso, se trata de contacto con agua contaminada durante el trabajo agrícola. En la Figura 19 se presenta el número de productores que mencionaron las afectaciones descritas.

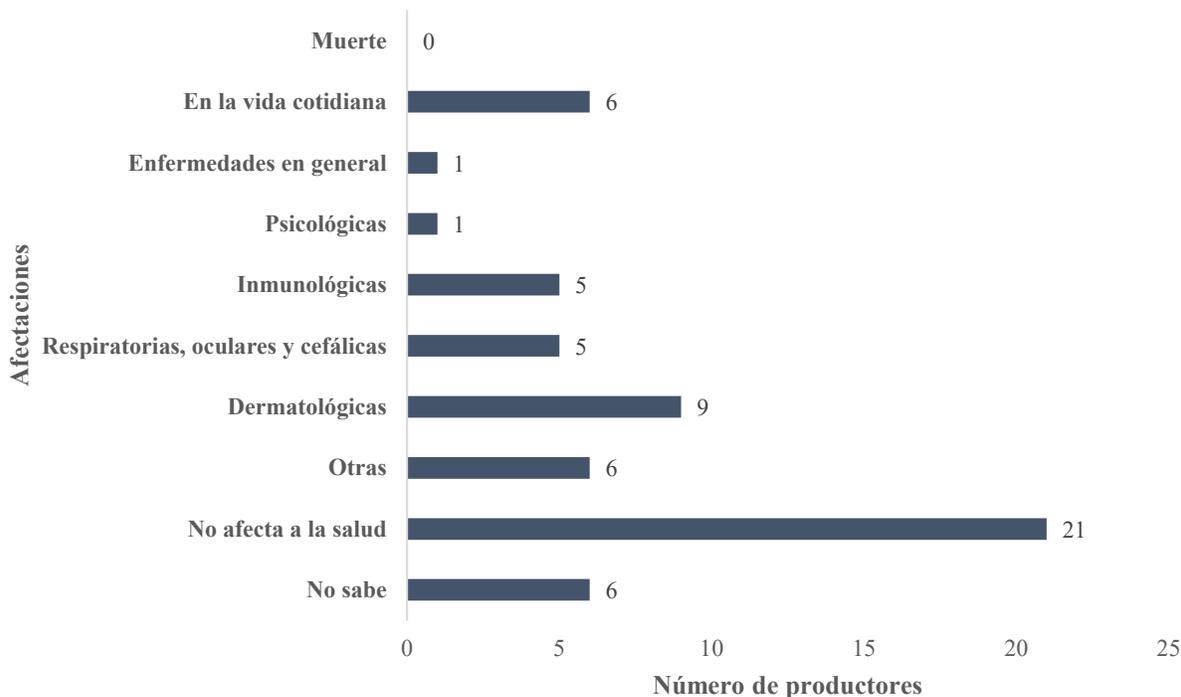


Figura 19. Percepción sobre afectaciones a la salud de los habitantes de la zona de riego.

Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Conforme a la Prueba Exacta de Fisher, no se presentó asociación estadísticamente significativa $p \leq 0.05$ entre la percepción de afectación de la contaminación del agua en la salud de los habitantes de la zona de riego con el sexo (Cuadro 20), escolaridad (Cuadro 21) y antigüedad (Cuadro 22) de los productores, a excepción de dos casos: la asociación entre la percepción de afectación al sistema inmune por contaminación y su escolaridad, así como la asociación entre el desconocimiento sobre la percepción de afectación a la salud y su sexo.

Se halló asociación de acuerdo con la prueba exacta de Fisher entre el desconocimiento sobre la percepción de la afectación a la salud por la contaminación del agua de riego y el sexo, con $p = 0.025$, $p \leq 0.05$ (Cuadro 20), donde el 100 % de los productores que indicaron no saber si la contaminación del agua afecta fueron hombres. Los productores que indicaron afectaciones no mencionaron desde hace cuánto tiempo las perciben.

Cuadro 20. Análisis de la relación entre sexo y percepción sobre la afectación a la salud por contaminación del agua de riego.

Percepción afectación a la salud por contaminación del agua de riego	Sexo Masculino		Sexo Femenino		Total	p-valor
	fi	%	fi	%		
Sin daños en la salud de piel	20	54.1	17	45.9	37	1
Daños en la salud de piel	5	55.6	4	44.4	9	
Sin problemas respiratorios, en ojos y cabeza	20	48.8	21	51.2	41	0.054
Problemas respiratorios, en ojos y cabeza	5	100.0	0	0.0	5	
Sin afectación al sistema inmune	21	51.2	20	48.8	41	0.357
Afectación al sistema inmune	4	80.0	1	20.0	5	
Sin efectos psicológicos	24	53.3	21	46.7	45	1
Efectos psicológicos	1	100.0	0	0.0	1	
Sin enfermedades en general	24	53.3	21	46.7	45	1
Enfermedades en general	1	100.0	0	0.0	1	
Sin efectos en la vida diaria	22	55.0	18	45.0	40	1
Efectos en la vida diaria	3	50.0	3	50.0	6	
Sabe si hay afectación a la salud	19	47.5	21	52.5	40	0.025*
No sabe si hay afectación a la salud	6	100.0	0	0.0	6	
Afecta a la salud	16	64.0	9	36.0	25	0.235
No afecta a la salud	9	42.9	12	57.1	21	
Sin otra afectación	21	52.5	19	47.5	40	0.673
Otra afectación	4	66.7	2	33.3	6	
Total	25	54.3	21	45.7	46	

* Hay asociación estadísticamente significativa $p \leq 0.05$ de acuerdo con la Prueba Exacta de Fisher. Fuente: Elaboración propia con información de campo (N = 48).

Se halló asociación de acuerdo con la prueba exacta de Fisher entre la percepción de la afectación al sistema inmune por la contaminación del agua de riego y la escolaridad (Cuadro 21), con $p = 0.045$, $p \leq 0.05$, donde el 59 % de los productores que indicaron que la contaminación del agua de riego no afectaba al sistema inmune, cuentan sólo con escolaridad de nivel primaria y el 100 % de los que indicaron que sí afecta al sistema inmune cuentan con nivel secundaria.

Cuadro 21. Análisis de la relación entre escolaridad y percepción sobre la afectación a la salud por contaminación del agua de riego.

Percepción afectación a la salud por contaminación del agua de riego	Escolaridad										Total	Prueba Exacta de Fisher	p- valor
	Primaria		Secundaria		Bachillerato		Licenciatura		Otro				
	fi	%	fi	%	fi	%	fi	%	fi	%			
Sin daños en la salud de piel	19	51.4	14	37.8	1	2.7	2	5.4	1	2.7	37	2.37	0.77
Daños en la salud de piel	5	13.5	3	8.1	1	2.7	0	0.0	0	0.0	9		
Sin problemas respiratorios, en ojos y cabeza	21	56.8	15	40.5	2	5.4	2	5.4	1	2.7	41	1.63	1
Problemas respiratorios, en ojos y cabeza	3	8.1	2	5.4	0	0.0	0	0.0	0	0.0	5		
Sin afectación al sistema inmune	24	64.9	12	32.4	2	5.4	2	5.4	1	2.7	41	9.22	0.05*
Afectación al sistema inmune	0	0.0	5	13.5	0	0.0	0	0.0	0	0.0	5		
Sin efectos psicológicos	24	64.9	16	43.2	2	5.4	2	5.4	1	2.7	45	6.47	0.48
Efectos psicológicos	0	0.0	1	2.7	0	0.0	0	0.0	0	0.0	1		
Sin enfermedades en general	24	64.9	16	43.2	2	5.4	2	5.4	1	2.7	45	6.47	0.48
Enfermedades en general	0	0.0	1	2.7	0	0.0	0	0.0	0	0.0	1		
Sin efectos en la vida diaria	20	54.1	16	43.2	1	2.7	2	5.4	1	2.7	40	4.3	0.35
Efectos en la vida diaria	4	10.8	1	2.7	1	2.7	0	0.0	0	0.0	6		
Sabe si hay afectación a la salud	20	54.1	17	45.9	1	2.7	1	2.7	1	2.7	40	8.58	0.06
No sabe si hay afectación a la salud	4	10.8	0	0.0	1	2.7	1	2.7	0	0.0	6		
Afecta a la salud	14	37.8	8	21.6	2	5.4	1	2.7	0	0.0	25	3.23	0.59
No afecta a la salud	10	27.0	9	24.3	0	0.0	1	2.7	1	2.7	21		
Sin otra afectación	20	54.1	15	40.5	2	5.4	2	5.4	1	2.7	40	1.52	1
Otra afectación	4	10.8	2	5.4	0	0.0	0	0.0	0	0.0	6		
Total	24	64.9	17	45.9	2	5.4	2	5.4	1	2.7	46		

* Hay asociación estadísticamente significativa $p \leq 0.05$ de acuerdo con la Prueba Exacta de Fisher.
Fuente: Elaboración propia con información de campo (N = 48).

Cuadro 22. Análisis de la relación entre antigüedad y percepción sobre la afectación a la salud por contaminación del agua de riego.

Percepción afectación a la salud por contaminación del agua de riego	Antigüedad (años dedicándose a la agricultura)								Total	Prueba	
	Menos de 10 años		entre 10 y 15 años		de 15 a 20 años		más de 20 años			Exacta de Fisher	p-valor
	fi	%	fi	%	fi	%	fi	%			
Sin daños en la salud de piel	13	35.1	5	13.5	3	8.1	15	40.5	37	1.482	0.955
Daños en la salud de piel	3	33.3	2	22.2	0	0.0	4	44.4	9		
Sin problemas respiratorios, en ojos y cabeza	15	36.6	6	14.6	3	7.3	16	39.0	41	2.125	0.81
Problemas respiratorios, en ojos y cabeza	1	20.0	1	20.0	0	0.0	3	60.0	5		
Sin afectación al sistema inmune	16	39.0	4	9.8	3	7.3	17	41.5	41	7.92	0.052
Afectación al sistema inmune	0	0.0	3	60.0	0	0.0	2	40.0	5		
Sin efectos psicológicos	16	35.6	6	13.3	3	6.7	19	42.2	45	6.884	0.239
Efectos psicológicos	0	0.0	1	100.0	0	0.0	0	0.0	1		
Sin enfermedades en general	16	35.6	7	15.6	3	6.7	18	40.0	45	4.886	1
Enfermedades en general	0	0.0	0	0.0	0	0.0	1	100.0	1		
Sin efectos en la vida diaria	13	32.5	6	15.0	3	7.5	17	42.5	40	1.697	0.913
Efectos en la vida diaria	3	50.0	1	16.7	0	0.0	2	33.3	6		
Sabe si hay afectación a la salud	12	30.0	7	17.5	3	7.5	17	42.5	40	3.231	0.489
No sabe si hay afectación a la salud	4	66.7	0	0.0	0	0.0	2	33.3	6		
Afecta a la salud	11	44.0	4	16.0	0	0.0	10	40.0	25	5.687	0.191
No afecta a la salud	5	23.8	3	14.3	3	14.3	9	42.9	21		
Sin otra afectación	14	35.0	6	15.0	3	7.5	16	40.0	40	1.308	1
Otra afectación	2	33.3	1	16.7	0	0.0	3	50.0	6		
Total	16	34.8	7	15.2	3	6.5	19	41.3	46		

Fuente: Elaboración propia con información de campo (N = 48).

Por su parte, se halló asociación entre la percepción sobre el grado contaminación cerca de la parcela del productor y la afectación al sistema inmune humano, con lo que se obtuvo un valor de la prueba exacta de Fisher de 0.015, con $p \leq 0.05$ (Cuadro 23), lo que indica que hay una asociación estadísticamente significativa entre la percepción de contaminación cerca de la parcela del productor y la percepción de la afectación al sistema inmune humano.

Cuadro 23. Análisis de la relación entre percepción sobre el grado contaminación cerca de la parcela del productor y de la afectación al sistema inmune humano.

Grado contaminación cerca de Parcela	Percepción afectación al sistema inmune				Total	Prueba Exacta de Fisher	p-valor
	No		Sí				
	fi	%	fi	%			
Nada	9	100.0	0	0.0	9		
Ligeramente contaminado	24	96.0	1	4.0	25		
Bastante contaminado	5	100.0	0	0.0	5	8.410	0.015*
Muy contaminado	3	50.0	3	50.0	6		
Total	41	91.1	4	8.9	45		

* Hay asociación estadísticamente significativa $p \leq 0.05$ de acuerdo con la Prueba Exacta de Fisher. Fuente: Elaboración propia con información de campo (N = 48).

Con relación a la opinión sobre la voluntad con que las personas enfrentan el riesgo de enfermarse por la contaminación de los canales de riego, se identificó diferencia entre los productores con nivel primaria y los productores con nivel secundaria que opinaron que las personas enfrentan el riesgo de enfermarse voluntariamente, siendo la media de la edad de los de nivel primaria mayor que la media de la edad de los de nivel secundaria con 59 y 30 años, respectivamente (Figura 20).

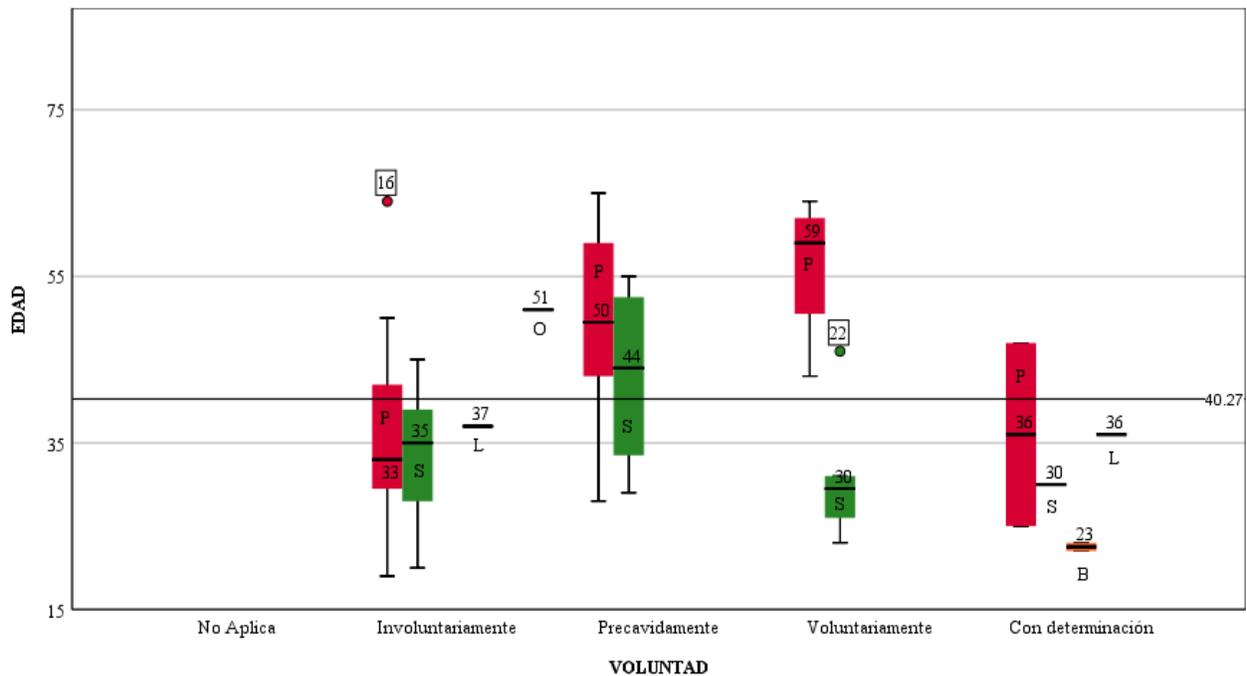


Figura 20. Grado de voluntad con el que los productores enfrentan el riesgo de enfermarse por la contaminación de los canales de riego según edad y escolaridad.

Se indican con número las medias de cada grupo. Se indican con letra y color el nivel de escolaridad con P: Primaria (color rojo), S: Secundaria (color verde), B: Bachillerato, (color naranja), L: Licenciatura (color amarillo), O: Otro (color rosa claro). Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Asimismo, mientras 39.6 % de los productores opinaron que las personas enfrentan involuntariamente el riesgo de enfermarse por la contaminación de los canales de riego, 58.3 % opinó que las personas lo enfrentan con algún grado de voluntad (25.0 % precavidamente, 20.8 % voluntariamente y 12.5 % con determinación).

La opinión sobre la proximidad temporal con la que los productores perciben el riesgo de enfermedad debido a la contaminación del agua de riego, indicó una media de calificación de 1.46 en una escala de 1 a 4, donde 1 es remoto, 2 es no muy inmediato, 3 es muy inmediato y 4 inmediato. Lo anterior muestra que los productores perciben al riesgo de enfermedad debido a la contaminación de los canales de riego como distante a suceder. Del total de productores, 56.3 % de los productores opinaron que el riesgo de enfermedad es remoto, 39.6 % opinó que el riesgo de enfermedad mantiene algún grado de proximidad temporal (35.4 % no muy inmediato y 4.2 % muy inmediato).

Sobre el grado de precisión de la información de las personas acerca de su exposición a enfermarse por la contaminación de los canales de riego, mientras 50.0 % de los productores opinaron que la información es inexacta, 48.0 % opinó que las personas contaban con algún grado precisión (29.2 % solo ligeramente precisa, 12.5 % bastante precisa y 6.3 % muy precisa).

Con relación a la opinión sobre el grado de conciencia de los técnicos e investigadores de enfermarse por la contaminación de los canales de riego, mientras 52.1 % de los productores opinaron que estaban nada conscientes, 41.7 % opinó que los técnicos e investigadores contaban con algún grado conciencia (18.8 % ligeramente conscientes, 12.5 % bastante conscientes y 10.4 % totalmente conscientes).

Sotelo-Pérez & Sotelo-Navalpotro (2020) mencionan que cuando los ciudadanos se involucran en la toma de decisiones públicas, como las relacionadas al medio ambiente, además del incremento en el potencial de efectividad de la gestión, el ciudadano se realiza como persona, por ello, el diálogo constante entre técnicos, investigadores y productores posibilitaría una mejor incidencia para atacar el problema de la contaminación del agua de riego en la zona de estudio.

Relacionado a la opinión sobre el grado de evasión de las personas expuestas a enfermarse por la contaminación de los canales de riego, mientras 22.9 % de los productores opinaron que las personas expuestas no podían evitar la enfermedad, 74.9 % opinó que las personas expuestas

podían evitar enfermarse en algún grado (20.8 % pueden evitar la enfermedad con facilidad razonable, 8.3 % pueden evitar la enfermedad con bastante facilidad y 45.8 % pueden evitar la enfermedad muy fácilmente).

Al referirse al riesgo de enfermarse por la contaminación de agua de riego se obtuvo una media de calificación de 1.60, en una escala de 1 a 4, donde 1 es nada riesgoso, 2 es ligeramente riesgoso, 3 es bastante riesgoso y 4 es muy riesgoso. Del total de productores, 50 % opinaron que era nada riesgoso, 43.8 % opinó que había algún grado de riesgo (35.4 % ligeramente riesgoso, 4.2 % bastante riesgoso y 4.2 % muy riesgoso).

Si este riesgo enfermará a las personas, mientras 81.3 % de los productores opinaron que las enfermará uno por uno, 14.6 % opinó que las enfermará en mayor proporción (12.5 % en números pequeños, 2.1 % en números grandes y 0.0 % todos a la vez).

Sobre la probabilidad que les cause una enfermedad mortal, se generó una media de calificación de 1.63, en una escala de 1 a 4, donde 1 es completamente improbable, 2 es ligeramente probable, 3 es bastante probable y 4 es muy probable. Del total de productores, 50 % opinaron que era completamente improbable, el 45.9 % opinó que había alguna probabilidad de que este riesgo causase una enfermedad mortal (37.5 % ligeramente probable, 2.1 % bastante probable y 6.3 % muy probable).

La opinión sobre qué tan asustadas están las personas ante el riesgo de enfermarse por la contaminación de los canales de riego, mientras 81.3 % de los productores opinaron que las personas estaban nada asustadas, 14.6 % opinó que estaban ligeramente asustadas. Por su parte, se halló asociación de acuerdo con la prueba exacta de Fisher entre el grado de temor de los productores ante el riesgo de enfermarse por la contaminación de los canales de riego y su sexo, con $p = 0.01$, $p \leq 0.05$ (Cuadro 24).

Cuadro 24. Análisis de la relación entre el grado de temor de los productores ante el riesgo de enfermarse por la contaminación de los canales de riego y su sexo.

Las personas ante este riesgo están	Sexo				Total	p-valor
	Hombre		Mujer			
	fi	%	fi	%		
Nada asustadas	17	43.6	22	56.4	39	0.01
Ligeramente asustadas	7	100.0	0	0.0	7	
Total	24	52.2	22	47.8	46	

Fuente: Elaboración propia con información de campo (N = 48).

Relacionado a la previsibilidad de los eventos que llevaron al riesgo de enfermarse por la contaminación de los canales de riego, mientras 41.7 % de los productores opinaron que eran imprevisibles, 56.4 % opinó que había algún grado de previsibilidad de los eventos (31.3 % ligeramente previsibles, 6.3 % bastante previsibles y 18.8 % muy previsibles).

Con relación a cuántas personas están expuestas a este riesgo, mientras 45.8 % de los productores opinaron que ninguna, 50 % opinó que había cierta cantidad de personas expuestas (20.8 % algunas, 6.3 % bastantes y 22.9 % una gran cantidad).

Sobre si este riesgo plantea cierta amenaza para las generaciones futuras, mientras 43.8 % de los productores opinaron que no plantea ninguna amenaza, 54.2 % opinó que había cierta amenaza (29.2 % plantea alguna amenaza, 12.5 % plantea una gran amenaza y 12.5 % plantea una muy grande amenaza). Por su parte, se halló asociación de acuerdo con la prueba exacta de Fisher entre la percepción del riesgo de una amenaza para las generaciones futuras y la percepción de contaminación cerca de la Central Hidroeléctrica Portezuelo I, con $p = 0.007$, $p \leq 0.05$ (Cuadro 25). También, se halló asociación de acuerdo con la prueba exacta de Fisher entre la percepción del riesgo de una amenaza para las generaciones futuras y la percepción de contaminación cerca de la parcela del productor, con $p = 0.009$, $p \leq 0.05$ (Cuadro 26).

Cuadro 25. Análisis de la relación entre la percepción del riesgo de una amenaza para las generaciones futuras y la percepción de contaminación cerca de la Central Hidroeléctrica Portezuelo I.

Amenaza riesgo generaciones futuras	Grado contaminación cerca C. Hidroeléctrica Portezuelo I								Total	Prueba Exacta de Fisher	p-valor	
	Nada	ligeramente contaminado		bastante contaminado		muy contaminado						
	fi	%	fi	%	fi	%	fi	%				fi
No plantea ninguna amenaza	6	28.6	8	38.1	4	19.05	3	14.3	21			
Plantea alguna amenaza	0	0.0	7	50.0	3	21.43	4	28.6	14			
Plantea una gran amenaza	0	0.0	1	16.7	0	0	5	83.3	6	18.85	0.007*	
Plantea una muy grande amenaza	0	0.0	0	0.0	1	16.67	5	83.3	6			
Total	6	12.8	16	34.0	8	17.02	17	36.2	47			

* Hay asociación estadísticamente significativa $p \leq 0.05$ de acuerdo con la Prueba Exacta de Fisher. Fuente: Elaboración propia con información de campo (N = 48).

Cuadro 26. Análisis de la relación entre la percepción del riesgo de una amenaza para las generaciones futuras y la percepción de contaminación cerca de la parcela del productor.

Amenaza riesgo generaciones futuras	Grado contaminación cerca de Parcela								Total	Prueba Exacta de Fisher	p-valor	
	Nada	ligeramente contaminado		bastante contaminado		muy contaminado						
	fi	%	fi	%	fi	%	fi	%				fi
No plantea ninguna amenaza	7	33.3	12	57.1	1	4.762	1	4.8	21			
Plantea alguna amenaza	1	7.1	10	71.4	2	14.29	1	7.1	14			
Plantea una gran amenaza	0	0.0	1	16.7	1	16.67	4	66.7	6	17.694	0.009*	
Plantea una muy grande amenaza	2	33.3	2	33.3	1	16.67	0	0.0	5			
Total	10	21.3	25	53.2	5	10.64	6	12.8	46			

* Hay asociación estadísticamente significativa $p \leq 0.05$ de acuerdo con la Prueba Exacta de Fisher. Fuente: Elaboración propia con información de campo (N = 48).

La opinión sobre la probabilidad de verse afectado por la contaminación del agua de riego, mientras 43.8 % de los productores opinaron que es poco probable, 54.2 % opinó que había cierta probabilidad de afectación (29.2 % ligeramente probable, 12.5 % bastante probable y 12.5 % muy probable). Por su parte, se halló asociación de acuerdo con la prueba exacta de Fisher

entre la posibilidad de afectación por la contaminación del agua de riego y su escolaridad, con $p = 0.006$, $p \leq 0.05$ (Cuadro 27). También, se halló asociación de acuerdo con la prueba exacta de Fisher entre la posibilidad de afectación por la contaminación del agua de riego y la percepción del grado contaminación cerca de Jagüey, con $p = 0.011$, $p \leq 0.05$ (Cuadro 28).

Cuadro 27. Análisis de la relación entre la posibilidad de afectación por contaminación del agua de riego y su escolaridad.

Posibilidad de afectación por contaminación del agua de riego	Escolaridad										Total	Prueba Exacta de Fisher	p-valor
	Primaria		Secundaria		Bachillerato		Licenciatura		Otro				
	fi	%	fi	%	fi	%	fi	%	fi	%			
Poco probable	11	50.0	11	50.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	22	21.392	0.006*
Ligeramente probable	11	73.3	2	13.3	0	0.0	1	6.7	1	6.7	15		
Bastante probable	2	40.0	1	20.0	2	40.0	0	0.0	0	0.0	5		
Muy probable	1	20.0	3	60.0	0	0.0	1	20.0	0	0.0	5		
Total	25	53.2	17	36.2	2	4.3	2	4.3	1	2.1	47		

* Hay asociación estadísticamente significativa $p \leq 0.05$ de acuerdo con la Prueba Exacta de Fisher. Fuente: Elaboración propia con información de campo (N = 48).

Cuadro 28. Análisis de la relación entre la posibilidad de afectación por contaminación del agua de riego y la percepción del grado contaminación cerca de Jagüey.

Posibilidad de afectación por la contaminación del agua de riego	Grado contaminación cerca de Jagüey								Total	Prueba Exacta de Fisher	p-valor
	Nada		ligeramente contaminado		bastante contaminado		muy contaminado				
	fi	%	fi	%	fi	%	fi	%			
Poco probable	5	23.8	11	52.4	2	9.524	4	19.0	22	17.301	0.011*
Ligeramente probable	0	0.0	7	50.0	6	42.86	1	7.1	14		
Bastante probable	0	0.0	4	66.7	1	16.67	0	0.0	5		
Muy probable	0	0.0	1	16.7	0	0	4	66.7	5		
Total	5	10.6	23	48.9	9	19.15	9	19.1	46		

* Hay asociación estadísticamente significativa $p \leq 0.05$ de acuerdo con la Prueba Exacta de Fisher. Fuente: Elaboración propia con información de campo (N = 48).

Los productores calificaron la probabilidad de verse en un futuro afectado por la contaminación del agua de riego con una media de 1.85, en una escala de 1 a 4, donde 1 es poco probable, 2 es ligeramente probable, 3 es bastante probable y 4 es muy probable. Del total de productores, 37.5 % de los productores opinaron que es poco probable, 60.4 % opinó que había cierta probabilidad de afectación futura (45.8 % ligeramente probable, 6.3 % bastante probable y 8.3 % muy probable. En la Figura 21, se observa el número de productores que percibieron algún grado de probabilidad de afectación por la contaminación del agua de riego.

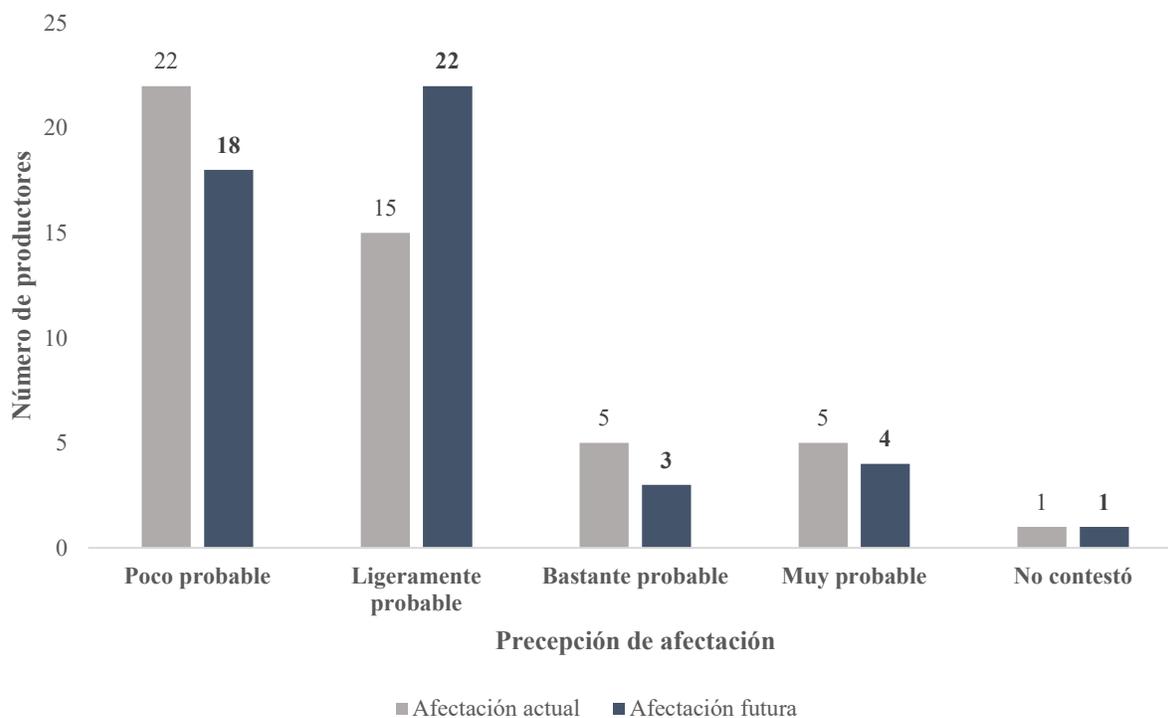


Figura 21. Percepción sobre la probabilidad de afectación por la contaminación del agua de riego.
 Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Por su parte, se halló asociación de acuerdo con la prueba exacta de Fisher entre la posibilidad de verse afectado en un futuro por la contaminación del agua de riego y su escolaridad, con $p = 0.023$, $p \leq 0.05$ (Cuadro 29). También, se halló asociación de acuerdo con la prueba exacta de Fisher con $p = 0.022$, $p \leq 0.05$ entre la posibilidad de verse afectado en un futuro por la contaminación del agua de riego y las percepciones sobre el grado contaminación cerca de la Central Hidroeléctrica Portezuelo I (Cuadro 30), el grado contaminación cerca del Jagüey (Cuadro 31) y el grado contaminación cerca de la parcela del productor (Cuadro 32).

Cuadro 29. Análisis de la relación entre la posibilidad de afectación futura por contaminación del agua de riego y su escolaridad.

Posibilidad afectación futura contaminación del agua de riego	Escolaridad										Total	Prueba Exacta de Fisher	p-valor
	Primaria		Secundaria		Bachillerato		Licenciatura		Otro				
	fi	%	fi	%	fi	%	fi	%	fi	%			
Poco probable	12	66.7	5	22.7	1	4.5	0	0.0	0	0.0	18	19.734	0.023*
Ligeramente probable	13	59.1	7	46.7	0	0.0	1	6.7	1	6.7	22		
Bastante probable	0	0.0	3	60.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	3		
Muy probable	0	0.0	2	40.0	1	20.0	1	20.0	0	0.0	4		
Total	25	53.2	17	36.2	2	4.3	2	4.3	1	2.1	47		

* Hay asociación estadísticamente significativa $p \leq 0.05$ de acuerdo con la Prueba Exacta de Fisher. Fuente: Elaboración propia con información de campo (N = 48).

Cuadro 30. Análisis de la relación entre la posibilidad de afectación futura por contaminación del agua de riego y la percepción sobre el grado contaminación cerca de la Central Hidroeléctrica Portezuelo I.

Posibilidad afectación futura contaminación del agua de riego	Grado contaminación cerca C. Hidroeléctrica Portezuelo I								Total	Prueba Exacta de Fisher	p-valor
	Nada		ligeramente contaminado		bastante contaminado		muy contaminado				
	fi	%	fi	%	fi	%	fi	%			
Poco probable	6	28.6	4	19.0	5	23.81	3	14.3	18	18.23	0.006*
Ligeramente probable	0	0.0	11	78.6	2	14.29	9	64.3	22		
Bastante probable	0	0.0	1	16.7	0	0	2	33.3	3		
Muy probable	0	0.0	0	0.0	1	16.67	3	50.0	4		
Total	6	12.8	16	34.0	8	17.02	17	36.2	47		

* Hay asociación estadísticamente significativa $p \leq 0.05$ de acuerdo con la Prueba Exacta de Fisher. Fuente: Elaboración propia con información de campo (N = 48).

Cuadro 31. Análisis de la relación entre la posibilidad de afectación futura por contaminación del agua de riego y la percepción sobre el grado contaminación cerca del Jagüey.

Posibilidad afectación futura contaminación del agua de riego	Grado contaminación cerca del Jagüey								Total	Prueba Exacta de Fisher	p-valor
	Nada		ligeramente contaminado		bastante contaminado		muy contaminado				
	fi	%	fi	%	fi	%	fi	%			
Poco probable	5	23.8	7	33.3	2	9.52	3	14.3	17	15.631	0.022*
Ligeramente probable	0	0.0	12	85.7	7	50	3	21.4	22		
Bastante probable	0	0.0	3	50.0	0	0	0	0.0	3		
Muy probable	0	0.0	1	16.7	0	0	3	50.0	4		
Total	5	10.6	23	48.9	9	19.15	9	19.1	46		

* Hay asociación estadísticamente significativa $p \leq 0.05$ de acuerdo con la Prueba Exacta de Fisher. Fuente: Elaboración propia con información de campo (N = 48).

Cuadro 32. Análisis de la relación entre la posibilidad de afectación futura por contaminación del agua de riego y la percepción sobre el grado contaminación cerca de la parcela del productor.

Posibilidad afectación futura contaminación del agua de riego	Grado contaminación cerca de la Parcela								Total	Prueba Exacta de Fisher	p-valor
	Nada		ligeramente contaminado		bastante contaminado		muy contaminado				
	fi	%	fi	%	fi	%	fi	%			
Poco probable	6	28.6	11	52.4	1	4.762	0	0.0	18		
Ligeramente probable	3	21.4	13	92.9	3	21.43	2	14.3	21		
Bastante probable	0	0.0	1	16.7	0	0	2	33.3	3	16.92	0.012*
Muy probable	1	16.7	0	0.0	1	16.67	2	33.3	4		
Total	10	21.3	25	53.2	5	10.64	6	12.8	46		

* Hay asociación estadísticamente significativa $p \leq 0.05$ de acuerdo con la Prueba Exacta de Fisher. Fuente: Elaboración propia con información de campo (N = 48).

Sobre si considera que la contaminación de los canales de riego podría ser una catástrofe para la población y causar enfermedad y muerte, mientras 43.8 % de los productores opinaron que causaría ninguna enfermedad y muerte, 54.2 % opinó que podría causar cierta cantidad de enfermedades y muertes (41.7 % algunas enfermedades y muertes, 8.3 % bastantes enfermedades y muertes y 4.2 % muchas enfermedades y muertes). Por su parte, se halló asociación de acuerdo con la prueba exacta de Fisher entre la percepción sobre las catástrofes para la población por contaminación del agua de riego y la percepción sobre el grado contaminación cerca del Jagüey, con $p = 0.024$, $p \leq 0.05$ (Cuadro 33).

Cuadro 33. Análisis de la relación entre la percepción sobre las catástrofes para la población por contaminación del agua de riego y la percepción sobre el grado contaminación cerca del Jagüey.

Catástrofes para la población por contaminación del agua de riego	Grado contaminación cerca de Jagüey								Total	Prueba Exacta de Fisher	p-valor
	Nada		ligeramente contaminado		bastante contaminado		muy contaminado				
	fi	%	fi	%	fi	%	fi	%			
Ninguna enfermedad o muerte	5	23.8	6	28.6	4	19.05	5	23.8	20		
Algunas enfermedades y muertes	0	0.0	14	100.0	5	35.71	1	7.1	20		
Bastantes enfermedades y muertes	0	0.0	2	33.3	0	0	2	33.3	4	15.477	0.024*
Muchas enfermedades y muertes	0	0.0	1	16.7	0	0	1	16.7	2		
Total	5	10.6	23	48.9	9	19.15	9	19.1	46		

* Hay asociación estadísticamente significativa $p \leq 0.05$ de acuerdo con la Prueba Exacta de Fisher. Fuente: Elaboración propia con información de campo (N = 48).

La opinión sobre la visibilidad de los procesos por los que la contaminación del agua podría causar enfermedades y daños, mientras 50 % de los productores opinaron que los procesos eran invisibles, 47.9 % opinó que podrían tener cierto grado de visibilidad (33.3 % ligeramente visibles, 12.5 % bastante visibles y 2.1 % muy visibles). Vargas (1994) indicó que la percepción da origen a las evidencias, conformándolas no sólo a partir de las características físicas sino también a partir de la cultura y valores que se han asumido, por lo que a fin de preservar el recurso hídrico que les llega, a pesar de su baja calidad, los productores han preferido no evidenciar la relación entre la contaminación del agua y el riesgo sanitario que representa.

En razón de aumentar los riesgos de seguir regando con estas aguas, la media de calificación indicada por los productores fue de 1.83, donde 1 es no aumenta, 2 es aumenta un poco, 3 es aumenta bastante y 4 es aumenta mucho. Del total de productores, 41.7 % de los productores opinaron que no aumenta este riesgo, 56.2 % opinó que este riesgo aumenta en cierto grado (39.6 % aumenta un poco, 8.3 % aumenta bastante y 8.3 % aumenta mucho).

Con relación a la opinión sobre la facilidad de reducir el riesgo, mientras 66.7 % de los productores opinaron que no es fácil de reducir, 31.3 % opinó que este riesgo es fácil de reducir en cierto grado (22.9 % es algo fácil de reducir, 4.2 % es bastante fácil de reducir y 4.2 % es muy fácil de reducir).

En el Cuadro 34, se presentan las características agrupadas conforme a las dimensiones “desconocido” y “miedo”, planteadas en el “paradigma psicométrico” descrito por Aragonés *et al.* (2017). La variable con la media más alta fue “Incontrolable” (Media = 2.79; Desviación Estándar = 1.07) situada en la dimensión “miedo” y referente a la percepción de los productores sobre la facilidad con que han podido evadir la enfermedad causada por la contaminación de los canales de riego. Por su parte, la variable con la media más alta en la dimensión “desconocido” fue “Personas expuestas” (Media = 2.07; Desviación Estándar = 1.24) y referente a la percepción de los productores sobre la cantidad de personas expuestas al riesgo de enfermarse por la contaminación de los canales de riego. De la dimensión “miedo”, sucedieron a las medias de las variables anteriores las variables “Involuntario” (Media = 2.06; Desviación Estándar = 1.07), referente a la percepción sobre la voluntad con que los productores enfrentan el riesgo de enfermarse por la contaminación de los canales de riego y “Control preventivo” (Media = 2.02;

Desviación Estándar = 1.13), referente a la percepción de los productores sobre la previsibilidad de los eventos que llevaron al riesgo de enfermarse por la contaminación de los canales de riego.

Cuadro 34. Estadísticas univariadas de las 18 características del modelo del "paradigma psicométrico".

Variable	N	Media	Desviación Estándar
MIEDO			
Involuntario (Item 41)	47	2.06	1.07
Incontrolable (Item 45)	47	2.79	1.27
Potencial catastrófico (Item 47)	46	1.17	0.44
Consecuencias fatales (Item 48)	46	1.63	0.83
Miedo (Item 49)	46	1.15	0.36
Control preventivo (Item 50)	47	2.02	1.13
Riesgo para las generaciones futuras (52)	47	1.94	1.05
Efecto inmediato (53)	47	1.85	1.00
Equitativo (Item 54)	47	1.85	0.88
Catástrofe global (Item 55)	47	1.72	0.80
Incremento del riesgo (Item 57)	47	1.83	0.92
No fácilmente reducido (Item 58)	47	1.45	0.78
DESCONOCIDO			
Efecto demorado (Item 2)	46	1.46	0.59
Desconocimiento a lo que se está expuesto (Item 3)	47	1.74	0.92
Desconocimiento científico (Item 44)	45	1.80	1.06
Nuevo riesgo (Item 46)	45	1.60	0.78
No observable (Item 56)	47	1.66	0.79
Personas expuestas (Item 51)	46	2.07	1.24

Fuente: Elaboración propia con información de campo y adaptado de Aragonés *et al.* (2017).

5.3.5 Afectación del agua residual a los animales

Los productores afirmaron que el agua de riego ha afectado a los animales en 12.5 %, mientras que 66.7 % y 2.1 % indicaron que no les afectaba y que era incierto, respectivamente. Los productores han observado malestares en los animales que entran a las parcelas de riego, tales como parásitos en el sistema digestivo (14.6 %), infecciones en la piel (8.3 %), infecciones respiratorias (2.1 %), enrojecimiento de ojos (4.2 %), mayor facilidad de enfermarse (4.2 %) y otros malestares (8.3 %), mientras que 62.5 % declaró no haber notado malestares en los animales. Comentaron que han notado malestares en los animales cuando estos toman el agua de riego, por lo que 66.7 % mencionó que evitaban darles esa agua para disminuir las afectaciones, 4.2 % dijo que consultaban al veterinario o usaban desparasitantes y 14.6 % dijo que nada hacían para disminuir las afectaciones (Figura 22).

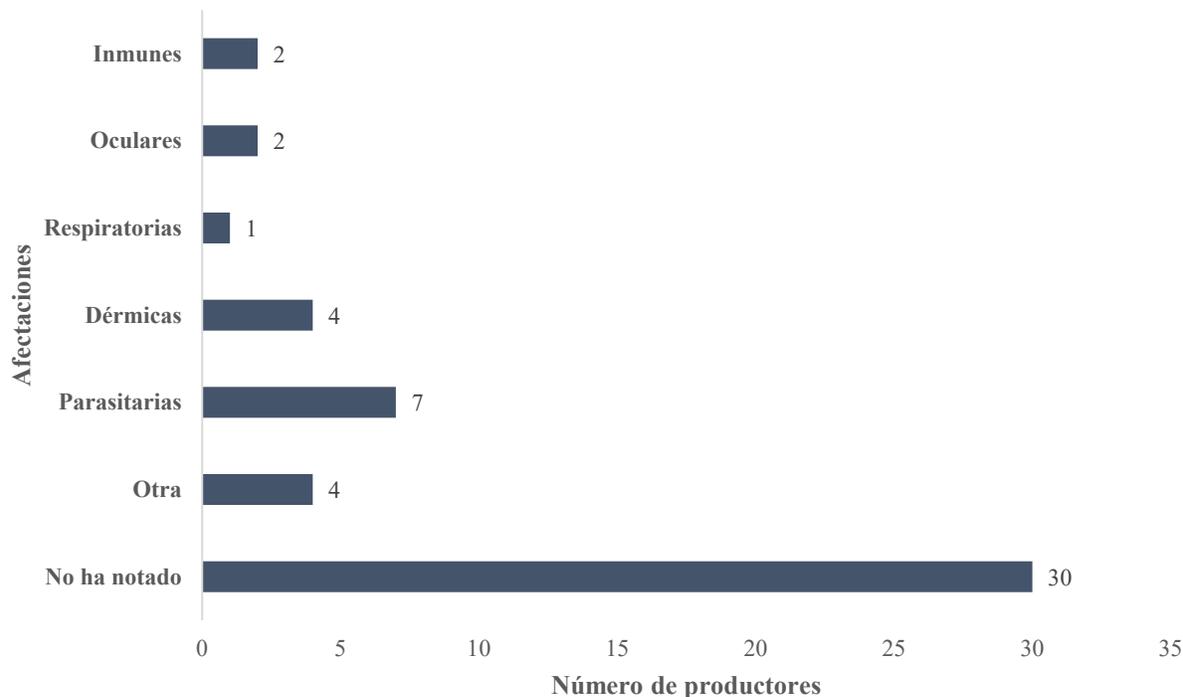


Figura 22. Percepción sobre malestar en animales que tienen contacto con el agua de riego.

Fuente: Elaboración propia con información de campo.

5.3.6 Opinión de los productores sobre el cultivo de nopal

Con respecto al nopal producido con riego, 16.7 % consideró que su calidad es mejor con relación al nopal producido en condiciones temporal, 47.9 % opinó lo contrario, mencionando que es mejor el de temporal, 14.6 % opinó que es de la misma calidad y 8.3 % indicó que era incierto.

Los productores señalaron que las razones por las que han reemplazado otros cultivos con el cultivo de nopal, han sido porque ya saben cómo manejar la tierra con el cultivo de nopal (12.5 %), porque les genera mayores ganancias (25.0 %), porque tiene características que lo hacen redituable (18.8 %), para rotar el terreno (12.5 %) y por necesidad del productor (4.2 %).

Los cultivos que han sido reemplazados por el cultivo de nopal en fracciones de las parcelas de los productores desde que comenzaron a dedicarse a la agricultura son: epazote (22.9 %), alfalfa (16.7 %), hierbabuena (22.9 %), huahuzontle (16.7 %), cilantro (31.3 %), cebolla (27.1 %), maíz (18.8 %), perejil (29.2 %), girasol (18.8 %), nora (16.7 %), margarita (10.4 %), terciopelo (18.8 %), cempasúchil (16.7 %), nube (16.7 %), aster (16.7 %), gladiola (22.9 %), crisantemo (12.5

%), sorgo (12.5 %), calabacita (20.8 %), tomate (20.8 %), arabela (14.6 %), rábano (25.0 %), frijol (18.8 %), flor (14.6 %), perejil (4.2 %), ejote (6.3 %), brócoli (8.3 %), coliflor (4.2 %), solidago (2.1 %) y lechuga (2.1 %). El 27.1 % indicaron que nunca han reemplazado otro cultivo pues siempre han sembrado nopal.

5.4 Experiencia agrícola

Los productores revelaron que se dedican a la agricultura desde hace menos de 10 años (33.3 %), entre 10 y 15 años (14.6 %), de 15 a 20 años (6.3 %) y más de 20 años (43.8 %). Han cultivado en la zona de estudio nopal verdura (100 %), epazote (12.5 %), alfalfa (18.8 %), hierba buena (16.7 %), huauzontle (16.7 %), cilantro (29.2 %), cebolla (25.0 %), maíz (20.8 %), perejil (18.8 %), girasol (12.5 %), nora (14.6 %), margarita (14.6 %), terciopelo (27.1 %), cempasúchil (20.8 %), nube (10.4 %), aster (20.8 %), gladiola (22.9 %), crisantemo (10.4 %), sorgo (12.5 %), calabacita (20.8 %), tomate (20.8 %), arabela (12.5 %), rábano (18.8 %), frijol (10.4 %), flor (8.3 %) y otros cultivos (6.3 %). La frecuencia con la que los productores indicaron que siembran nopal fue nunca (0.0 %), a veces (6.3 %), constantemente (16.7 %) y siempre (72.9 %).

5.5 Manejo agronómico del nopal

5.5.1 Preparación del suelo

Los productores preparan el terreno antes de establecer el cultivo de nopal; realizando un barbecho, subsoleado, surcado, paso del arado y paso de la rastra.

5.5.2 Plantación de nopal

La distancia entre surcos es en promedio 99.88 cm y varía de los 40 a los 150 cm. La distancia entre plantas de nopal mide en promedio 20.81 cm. La plantación se realiza mayoritariamente en época de seca, y en menos proporción en época de lluvias. Una buena plantación permite tener suficiente espacio para producir, evitar espinarsse, movilizar entre surcos y evitar plagas y enfermedades.

5.5.3 Fertilización

Los fertilizantes químicos que aplican al nopal son: urea, triple 17 (17-17-17), potasio negro, Star 20-10-10, sulfato de amonio, nitromag, Yara, amonitro, Agromil plus y DAP 18-46-00.

5.5.4 Abonos orgánicos

Los abonos orgánicos que aplican al nopal son estiércol de vaca, gallinaza, estiércol ovino y biozyme.

5.5.5 Control de malezas

El deshierbe de las parcelas con cultivo de nopal se realiza de dos formas: i) manual, con machete y pala y ii) con control químico aplicando herbicidas, como Glifosato, Durmina, Paraquat, Faena, Lafam, Gesaprim, Gramoxone, Afalon, Bromoxinil, Hierbamina y Arrasa. Algunos realizan deshierbes de forma quincenal y otros mensual, bimestral, trimestral y semestralmente. El deshierbe se intensifica en temporada de lluvias.

5.5.6 Control de plagas

Para el control de plagas aplican alguno de estos insecticidas: Diazol, Diazinón, Foley, Rogor, Látigo, Arrivo, Suprathion, Furadán, Velcrón, Clorpirifos, Monocotrofos, Parathion metílico, Lannate, y Tapps. Pocos productores indicaron que los insecticidas orgánicos que aplican son Biodieberberina y Jabón Biodegradable Roma.

5.5.7 Control de enfermedades

Como fungicida químico solo aplican Manzate. No utilizan productos orgánicos.

5.5.8 Adherente

Como adherente usan jabón biodegradable Roma.

5.5.9 Poda y sanidad

Realizan sustitución y podas de plantas para eliminar plantas enfermas, viejas, o plantas con baja producción.

5.5.10 Riegos

Para el riego utilizan el agua que viene del río Atoyac, son aguas residuales. Durante la época seca dan entre 8 y 12 riegos cada 20 días iniciando en el mes de noviembre y concluyendo entre abril y junio, según el inicio de la época de lluvias.

5.5.11 Cosecha del nopal

Cosechan todo el año, pero existen dos épocas de mayor cosecha, entre marzo y mayo, y en diciembre. Forman pacas de cien unidades (pencas).

5.5.12 Mercado

Los productores venden a comerciantes minoristas y mayoristas. Los principales mercados son en Atlixco (tianguis y mercado de Santa Rita) y Central de abastos de la ciudad de Puebla; pocos comercializan en otros estados y en Estados Unidos. También existe la venta en la parcela, donde llegan compradores.

5.6 Elementos potencialmente tóxicos en el agua de uso agrícola

El agua es un recurso natural crítico para la agricultura; sin embargo, debido a la escasez de este recurso, el uso de aguas residuales tanto cruda, como tratada se ha visto extendido. Es por ello, que es importante asegurar la calidad del agua de riego, a fin de disminuir al máximo los riesgos a la salud. En este sentido, se presentan los resultados obtenidos al analizar el agua de riego de la zona en tres sitios de muestreo en época de lluvia (Cuadro 35) y en época de estiaje (Cuadro 37).

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997), los resultados indican que el agua de riego tuvo una alta concentración de grasas y aceites, superando en las tres estaciones el límite máximo permisible de $25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. En cuanto a la concentración de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT), se encontró que en ninguna de las muestras su concentración rebasó los límites máximos permisibles con base en la normatividad mexicana vigente (DOF, 1997). La concentración de huevos de helminto está en el umbral de la norma mexicana con $1 \text{ h}\cdot\text{L}^{-1}$. Al igual que en el estudio realizado por Olvera, Ocampo, Tornero, Silva, & González (2020), el pH fue menos ácido en época de lluvia que en época de estiaje.

Al comparar los resultados obtenidos del agua de riego en época de lluvia respecto a los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales de las normatividades de México (DOF, 1997), Canadá (Environment Canada, 2000) y España (BOE, 2002), como se observa en el Cuadro 36, el agua de riego empleada en este trabajo cumple con las tres normatividades en lo que respecta a los límites de cobre, cadmio, cromo, zinc y níquel. Sin

embargo, en el caso de cianuros, la estación 1 se encuentra fuera del límite canadiense, presentando un valor de $0.027 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ vs $0.025 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ para HCN.

Así mismo, se puede observar que, respecto al plomo, la normatividad canadiense es la más estricta presentando un límite igual a $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, seguida de la normatividad mexicana con un valor de $0.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ y finalmente la normatividad española con un valor de $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Al revisar los resultados obtenidos en las tres estaciones de estudio, podemos observar que el agua de riego cumple con las normatividades mexicana y española, con valores de $0.227 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Estación 1), $0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Estación 2) y $0.163 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Estación 3).

Finalmente, respecto al manganeso, la normatividad mexicana no contempla este elemento; sin embargo, al comparar los resultados obtenidos con la normatividad canadiense y española, podemos concluir que el agua de riego en época de lluvia cumple con la normatividad española, con valores menores a $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, obteniéndose valores de $0.08 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Estación 1), $0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Estación 2) y $0.18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Estación 3); sin embargo, respecto a la normatividad canadiense, las estaciones 1 y 3 se encuentran fuera del límite de $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ establecidos por Canadá.

Cuadro 35. Características físicas, químicas y biológicas del agua de riego en época de lluvia.

Parámetro	Unidades	Estaciones de muestreo*			Normatividad
		Estación 1	Estación 2	Estación 3	
Materia Flotante	Ausente presente	Presente	Ausente	Ausente	NMX-AA-006-SCFI-2010
Temperatura	°C	24.9	22.0	23.4	NMX-AA-007-SCFI-2013
pH	Unidades de pH	8.6	7.7	7.7	NMX-AA-008-SCFI-2016
Conductividad Eléctrica CE	$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	787	844	840	NMX-AA-093-SCFI-2000
Sólidos Disueltos Totales SDT	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	482.0	683.5	652.0	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Suspendidos Totales SST	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	11.33	168.97	64.00	NMX-AA-034-SCFI-2000
Sólidos Sedimentables SS	$\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$	0.0	1.8	1.0	NMX-AA-004-SCFI-2013
Cloruros	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	3.77	4.00	3.97	NMX-AA-073-SCFI-2001
Oxígeno Disuelto OD	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	3.33	2.29	2.50	NMX-AA-012-SCFI-2001
Grasas y aceites	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	214.56	4330.0	890.44	NMX-AA-028-SCFI-2001
Dureza Total como CaCO_3	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	109.92	109.39	108.34	N NMX-AA-072-SCFI-2000
Dureza al Calcio Ca^{2+}	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	63.95	64.47	65.53	N NMX-AA-072-SCFI-2000
Dureza al Magnesio Mg^{2+}	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	47.97	44.92	42.81	N NMX-AA-072-SCFI-2001
Alcalinidad	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	313.82	342.91	402.78	NMX-AA-036-SCFI-2001
Carbonatos $(\text{CO}_3)^{2-}$	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	22.29	0.0	0.0	NMX-AA-036-SCFI-2001
Sulfatos $(\text{SO}_4)^{2-}$	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	100.0	105.0	110.0	NMX-AA-074-SCFI-1881
Bicarbonatos $(\text{HCO}_3)^-$	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	257.38	281.19	330.28	NMX-AA-036-SCFI-2001
Nitrógeno total	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	12.7	15.7	15.3	NMX-AA-026-SCFI-2010
Fósforo Total P- $(\text{PO}_4)^{3-}$	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.6	1.5	1.4	PROY-NMX-AA-029/1-SCFI-2008
Cianuros	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.027	0.020	0.16	NMX-AA-058-SCFI-2001
Sodio Na^+	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	65.0	60.0	53.0	Flamometría
Potasio K^+	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	17.0	17.5	13.7	Flamometría
Calcio Ca^{2+}	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	25.56	25.77	26.19	Complejometría

*Nombres referenciales de las estaciones: Estación 1 Jagüey, Estación 2 Central Hidroeléctrica Portezuelo I, Estación 3 Canal de riego. Fuente: Elaboración propia con información de campo y análisis de laboratorio.

(Continuación Cuadro 35)

Parámetro	Unidades	Estaciones de muestreo*			Normatividad
		Estación 1	Estación 2	Estación 3	
Magnesio Mg ²⁺	mg·L ⁻¹	11.21	10.96	10.44	Complejometría
Cobre Cu ²⁺	mg·L ⁻¹	0.003	0.001	0.005	EPA ISO8466-1
Cadmio Cd ²⁺	mg·L ⁻¹	<0.0025	<0.0025	<0.0025	EPA ISO8466-1
Plomo Pb ²⁺	mg·L ⁻¹	0.227	0.150	0.163	EPA ISO8466-1
Hierro Fe ³⁺	mg·L ⁻¹	0.218	0.020	0.267	EPA ISO8466-1
Manganeso Mn ²⁺	mg·L ⁻¹	0.08	0.01	0.18	EPA ISO8466-1
Cromo Cr Total	mg·L ⁻¹	0.005	0.003	0.005	EPA ISO8466-1
Zinc Zn ²⁺	mg·L ⁻¹	0.081	0.072	0.142	EPA ISO8466-1
Níquel Ni ²⁺	mg·L ⁻¹	0.08	0.03	0.027	EPA ISO8466-1
Microbiológicos					
Huevos de Helminto	Huevo·L ⁻¹	1.0	1.0	1.0	NMX-AA-113-SCFI-2012
Coliformes totales	NMP·100 mL ⁻¹	14	>1100	>1100	NMX-AA-042-SCFI-2015
Coliformes fecales	NMP·100 mL ⁻¹	11	150	150	NMX-AA-042-SCFI-2015

*Nombres referenciales de las estaciones: Estación 1 Jagüey, Estación 2 Central Hidroeléctrica Portezuelo I, Estación 3 Canal de riego. Fuente: Elaboración propia con información de campo y análisis de laboratorio.

El agua de riego en época de lluvia no cumple con los límites de EPT establecidos por la Comunidad Europea (CE, 2008), a excepción del Ni en las estaciones 2 y 3. Si bien las características del agua aún son remediabiles, cabe destacar que el enfrentamiento cotidiano con las características indeseables de lo que podría ser un bien, en este caso, el agua, lleva al reconocimiento de la realidad por un proceso empírico que, de acuerdo con Jacobo-García (2018), consiste en que los usos de las aguas residuales entre ellos, el agrícola, es la fuente principal de microorganismos patógenos transferidos a la población a través del ambiente.

Cuadro 36. Concentración de EPT en el agua de riego en época de lluvia comparado con los límites permisibles de la normatividad mexicana, canadiense y española.

Parámetro (mg·L ⁻¹)	Estación 1	Estación 2	Estación 3	México		Canadá	España
				Ríos	Suelo		
Cianuros	0.027	0.02	0.16	3	3	0.025	2
Cobre	0.003	0.001	0.005	6	6	0.2	5
Cadmio	<0.0025	<0.0025	<0.0025	0.4	0.1	0.005	0.5
Plomo	0.227	0.15	0.163	1	10	0	1
Manganeso	0.08	0.01	0.18	NA	NA	0.05	2
Cromo	0.005	0.003	0.005	1.5	1	0.05	5
Zinc	0.081	0.072	0.142	20	20	0.5	10
Níquel	0.08	0.03	0.027	4	4	0.3	5

Fuente: Elaboración propia con información de campo, análisis de laboratorio y datos de las normatividades mexicana (DOF, 1997), canadiense (Environment Canada, 2000) y española (BOE, 2002).

Sobre la calidad del agua en época de estiaje (Cuadro 37), los resultados obtenidos muestran que el agua de riego cumplió con las normatividades mexicanas, canadiense y españolas en lo que respecta a los límites de cianuros y zinc (Cuadro 38). Así mismo, el agua cumplió con las normatividades mexicanas y españolas respecto a cobre, cadmio, plomo, cromo y níquel. Sin embargo, al comparar los resultados obtenidos con la normatividad canadiense, se identificó que los valores máximos permitidos de cobre ($0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ vs $<0.231 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), cadmio ($0.005 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ vs $<0.014 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), plomo ($0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ vs $<0.170 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), manganeso ($0.005 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ vs valores entre 1.487 y $2.112 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), cromo ($0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ vs $<0.280 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) y níquel ($0.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ vs <0.866) se encontraron fuera de los límites. Finalmente, al revisar los resultados de manganeso, se observó que la estación 3 presentó valores por arriba del límite español ($2.112 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ vs $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

Cuadro 37. Características físicas, químicas y biológicas del agua de riego en época de estiaje.

Parámetro	Unidades	Estaciones de muestreo*			Normatividad
		Estación 1	Estación 2	Estación 3	
Materia Flotante	Ausente presente	Ausente	Ausente	Ausente	NMX-AA-006-SCFI-2010
Temperatura	°C	21.0	20.9	20.1	NMX-AA-007-SCFI-2013
pH	Unidades de pH	7.5	7.4	7.5	NMX-AA-008-SCFI-2016
Conductividad Eléctrica CE	$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	1621	1631	1627	NMX-AA-093-SCFI-2000
Sólidos Disueltos Totales SDT	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1013	1121	1116	NMX-AA-034-SCFI-2001
Sólidos Suspendidos Totales SST	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	42.0	96.97	165.0	NMX-AA-034-SCFI-2000
Sólidos Sedimentables SS	$\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$	0.1	1.5	1.4	NMX-AA-004-SCFI-2013
Cloruros	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	126.20	126.91	127.62	NMX-AA-073-SCFI-2001
Oxígeno Disuelto OD	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.00	0.00	0.00	NMX-AA-012-SCFI-2001
Grasas y aceites	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1512.80	700.074	4069.82	NMX-AA-028-SCFI-2001
Dureza Total como CaCO_3	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1998.19	1034.09	1072.76	NMX-AA-072-SCFI-2000
Dureza al Calcio Ca^{2+} como CaCO_3	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1137.23	1026.72	980.68	NMX-AA-072-SCFI-2000
Dureza al Magnesio Mg^{2+} como CaCO_3	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	860.97	10.37	92.08	NMX-AA-072-SCFI-2001
Alcalinidad	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	697.95	700.39	680.87	NMX-AA-036-SCFI-2001
Carbonatos $(\text{CO}_3)^{2-}$	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.0	0.0	0.0	NMX-AA-036-SCFI-2001
Bicarbonatos $(\text{HCO}_3)^-$	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	257.38	281.19	330.28	NMX-AA-036-SCFI-2001
Nitrógeno total	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	39.83	51.98	57.63	NMX-AA-026-SCFI-2010
Fósforo Total P- $(\text{PO}_4)^{3-}$	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	4.13	3.98	4.08	PROY-NMX-AA-029/1-SCFI-2008
Cianuros	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	<0.018	<0.018	<0.018	NMX-AA-058-SCFI-2001
Sodio Na^+	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	65.0	60.0	53.0	Flamometría
Potasio K^+	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	17.0	17.5	13.5	Flamometría
Calcio Ca^{2+}	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	454.48	410.32	391.92	Complejometría

*Nombres referenciales de las estaciones: Estación 1 Jagüey, Estación 2 Central Hidroeléctrica Portezuelo I, Estación 3 Canal de riego. Fuente: Elaboración propia con información de campo y análisis de laboratorio.

(Continuación Cuadro 37)

Parámetro	Unidades	Estaciones de muestreo*			Normatividad
		Estación 1	Estación 2	Estación 3	
Magnesio Mg ²⁺	mg·L ⁻¹	209.99	2.53	22.46	Complejometría
Cobre Cu ²⁺	mg·L ⁻¹	<0.231	<0.231	<0.231	EPA ISO8466-1
Cadmio Cd ²⁺	mg·L ⁻¹	<0.014	<0.014	<0.014	EPA ISO8466-1
Plomo Pb ²⁺	mg·L ⁻¹	< 0.170	< 0.170	< 0.170	EPA ISO8466-1
Hierro Fe ³⁺	mg·L ⁻¹	< 0.23	< 0.23	< 0.23	EPA ISO8466-1
Manganeso Mn ²⁺	mg·L ⁻¹	1.487	1.866	2.112	EPA ISO8466-1
Cromo Cr Total	mg·L ⁻¹	< 0.280	< 0.280	< 0.280	EPA ISO8466-1
Zinc Zn ²⁺	mg·L ⁻¹	< 0.208	< 0.208	< 0.208	EPA ISO8466-1
Níquel Ni ²⁺	mg·L ⁻¹	< 0.866	< 0.866	< 0.866	EPA ISO8466-1
Microbiológicos					
Huevos de Helminto	Huevo·L ⁻¹	162	2	3	NMX-AA-113-SCFI-2012
Coliformes totales	NMP·100 mL ⁻¹	93 000 000	460 000 000	93 000 000	NMX-AA- 042-SCFI-2015
Coliformes fecales	NMP·100 mL ⁻¹	240 000 000	240 000 000	93 000 000	NMX-AA- 042-SCFI-2015

*Nombres referenciales de las estaciones: Estación 1 Jagüey, Estación 2 Central Hidroeléctrica Portezuelo I, Estación 3 Canal de riego. Fuente: Elaboración propia con información de campo y análisis de laboratorio.

Cuadro 38. Concentración de EPT en el agua de riego en época de estiaje comparado con los límites permisibles de la normatividad mexicana, canadiense y española.

Parámetro (mg·L ⁻¹)	Estación 1	Estación 2	Estación 3	México		Canadá	España
				Ríos	Suelo		
Cianuros	< 0.018	< 0.018	< 0.018	3	3	0.025	2
Cobre	< 0.231	< 0.231	< 0.231	6	6	0.2	5
Cadmio	< 0.014	< 0.014	< 0.014	0.4	0.1	0.005	0.5
Plomo	< 0.170	< 0.170	< 0.170	1	10	0	1
Manganeso	1.487	1.866	2.112	NA	NA	0.05	2
Cromo	< 0.280	< 0.280	< 0.280	1.5	1	0.05	5
Zinc	< 0.208	< 0.208	< 0.208	20	20	0.5	10
Níquel	< 0.866	< 0.866	< 0.866	4	4	0.3	5

Fuente: Elaboración propia con información de campo, análisis de laboratorio y datos de las normatividades mexicana (DOF, 1997), canadiense (Environment Canada, 2000) y española (BOE, 2002).

5.7 Elementos potencialmente tóxicos en suelos agrícolas

Las características físicas y químicas del suelo de las parcelas irrigadas con aguas provenientes del río Atoyac en la zona de estudio se presentan en el Cuadro 39 (parcelas 1 y 2) y Cuadro 40 (parcelas 3 y 4). Los niveles de alcalinidad variaron entre los sitios de muestreo de neutro (parcela 4) a medianamente alcalino (parcelas 1, 2 y 3), de lo que se observa que no existen problemas de acidez en tales sitios. En cuanto a la salinidad, se detectó un efecto ligero (parcelas 1 y 2) y nulo (parcelas 3 y 4) con base en su conductividad eléctrica. Ninguna de las parcelas mostró deficiencias en cuanto a materia orgánica ya que se encontró en un nivel medio. Los tres macronutrientes principales mostraron concentraciones altas, excepto en la parcela 1, donde se interpretó una concentración media de nitrógeno total. En cuanto a la concentración de EPT disponibles extraídos con ácido dietilentriaminopentaacético (DTPA por sus siglas en inglés), se determinó que es adecuada para los metales Fe, Cu, Mn y Zn, mientras que es normal para Pb, Cd y Ni en las cuatro parcelas, de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002).

Cuadro 39. Características físicas y químicas del suelo en parcelas 1 y 2 de la zona de estudio.

Parámetro	Unidades	Método	Parcela 1		Parcela 2	
			Valor	Interpretación	Valor	Interpretación
pH		AS-02*	7.9	Medianamente alcalino	7.44	Medianamente alcalino
M.O.	%	AS-07*	3.4	Medio	2.35	Medio
NT	%	AS-25*	0.119	Medio	0.25	Alto
Ca	cmol _c ·kg ⁻¹	AS-12*	17.2	Alto	12.8	Alto
Mg	cmol _c ·kg ⁻¹	AS-12*	5.6	Alto	4	Alto
Na	cmol _c ·kg ⁻¹	AS-12*	0.8		1.2	
K	cmol _c ·kg ⁻¹	AS-12*	5	Alto	6	Alto
CIC	cmol _c ·kg ⁻¹	AS-12*	34.6	Alto	31	Alto
P	mg·kg ⁻¹	Bray-1	163	Alto	228.6	Alto
DA	g·mL ⁻¹	Probeta	1.13		1.04	
CE	dS·m ⁻¹	AS-18*	1.34	Ligeramente salino	1.41	Ligeramente salino
DR	g·mL ⁻¹		2.46		2.14	
Humedad	%		7.29		13.76	
Porosidad	%		54.06		51.4	
PSB	%	AS-21*	82.6		77.4	

* NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002). ** EPA 3051 (EPA, 1998). Fuente: Elaboración propia con información de campo y análisis de laboratorio.

(Continuación Cuadro 39)

Parámetro	Unidades	Método	Parcela 1		Parcela 2	
			Valor	Interpretación	Valor	Interpretación
PSI	%	AS-21*	2.31		3.87	
(CO ₃) ²⁻	mmol·L ⁻¹	AS-20*	2.5		1.5	
(HCO ₃) ⁻	mmol·L ⁻¹	AS-20*	7		8.2	
Cl	mmol·L ⁻¹	AS-20*	20		36.9	
(SO ₄) ²⁻	mmol·L ⁻¹	AS-20*	177		565	
Cr _{total}	ppm	*	92		81	
Co _{total}	ppm	*	18		21	
Ba _{total}	ppm	*	295		283	
Fe _{total/disponible}	ppm	*/**	25860/11.9	-/ Adecuado	21870/24.1	-/ Adecuado
Cu _{total/disponible}	ppm	*/**	80/1.9	-/ Adecuado	81/3.2	-/ Adecuado
Mn _{total/disponible}	ppm	*/**	359/39.2	-/ Adecuado	495/36.6	-/ Adecuado
Zn _{total/disponible}	ppm	*/**	48/2.6	-/ Adecuado	63/6.4	-/ Adecuado
Pb _{total/disponible}	ppm	*/**	23/1.3	-/Normal	20/1.6	-/Normal
Cd _{total/disponible}	ppm	*/**	1/0.06	-/Normal	1/0.06	-/Normal
Ni _{total/disponible}	ppm	*/**	116/5.8	-/Normal	89/6.6	-/Normal

* NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002). ** EPA 3051 (EPA, 1998). Fuente: Elaboración propia con información de campo y análisis de laboratorio.

Cuadro 40. Características físicas y químicas del suelo en parcelas 3 y 4 de la zona de estudio.

Parámetro	Unidades	Método	Parcela 3		Parcela 4	
			Valor	Interpretación	Valor	Interpretación
pH		AS-02*	7.53	Medianamente alcalino	7.22	Neutro
M.O.	%	AS-07*	1.88	Medio	2.95	Medio
Nt.	%	AS-25*	0.103	Medio	0.139	Medio
Ca	cmol _c ·kg ⁻¹	AS-12*	14	Alto	11.2	Alto
Mg	cmol _c ·kg ⁻¹	AS-12*	4.8	Alto	3.6	Alto
Na	cmol _c ·kg ⁻¹	AS-12*	0.9		0.8	
K	cmol _c ·kg ⁻¹	AS-12*	1	Alto	0.7	Alto
CIC	cmol _c ·kg ⁻¹	AS-12*	14.2	Baja	23.1	Media
P	mg·kg ⁻¹	Bray-1	85.2	Alto	92.9	Alto
DA	g·mL ⁻¹	Probeta	1.32		1.26	
CE	dS·m ⁻¹	AS-18*	1.05	Efecto nulo salinidad	0.71	Efecto nulo salinidad
DR	g·mL ⁻¹		2.55		2.41	
Humedad	%		16.9		16.3	

* NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002). ** EPA 3051 (EPA, 1998). Fuente: Elaboración propia con información de campo y análisis de laboratorio.

(Continuación Cuadro 40)

Parámetro	Unidades	Método	Parcela 3		Parcela 4	
			Valor	Interpretación	Valor	Interpretación
Porosidad	%		48.2		47.7	
PSB	%	AS-21*	145.7		70.5	
PSI	%	AS-21*	6.3		3.4	
(CO ₃) ⁻²	mmol·L ⁻¹	AS-20*	1		0.5	
(HCO ₃) ⁻	mmol·L ⁻¹	AS-20*	4.5		4.7	
Cl	mmol·L ⁻¹	AS-20*	21.7		12.7	
(SO ₄) ⁻²	mmol·L ⁻¹	AS-20*	137		94	
Cr _{total}	ppm	*	26		53	
Co _{total}	ppm	*	7		24	
Ba _{total}	ppm	*	173		312	
Fe _{total/disponible}	ppm	*/**	13969/10.8	-/ Adecuado	20624/19.1	-/ Adecuado
Cu _{total/disponible}	ppm	*/**	14/4.2	-/ Adecuado	23/8	-/ Adecuado
Mn _{total/disponible}	ppm	*/**	258/14.2	-/ Adecuado	740/19	-/ Adecuado
Zn _{total/disponible}	ppm	*/**	29/1.9	-/ Adecuado	56/3.7	-/ Adecuado
Pb _{total/disponible}	ppm	*/**	2/1.5	-/ Normal	16/2.4	-/ Normal
Cd _{total/disponible}	ppm	*/**	0/0.06	-/ Normal	0/0.06	-/ Normal
Ni _{total/disponible}	ppm	*/**	45/1.7	-/ Normal	102/3.7	-/ Normal

* NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002). ** EPA 3051 (EPA, 1998). Fuente: Elaboración propia con información de campo y análisis de laboratorio.

En el Cuadro 41 se presentan las características físicas y químicas del sustrato donde se sembró el nopal verdura en invernadero.

Cuadro 41. Características físicas y químicas del sustrato empleado para la siembra de nopal en invernadero.

Parámetro	Unidades	Método	Invernadero	
			Valor	Interpretación*
pH		AS-02*	6.89	Neutro
M.O.	%	AS-07*	1.70	Medio
NT	%	AS-25*	0.096	Bajo
Textura				Franco arcillosa
Arena	%	AS-09*	36.8	
Limo	%	AS-09*	32.0	
Arcilla	%	AS-09*	31.2	
Ca	cmol _c ·kg ⁻¹	AS-12*	9.6	Medio
Mg	cmol _c ·kg ⁻¹	AS-12*	3.2	Alto

* NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002). ** EPA 3051 (EPA, 1998). Fuente: Elaboración propia con información de campo, análisis de laboratorio y datos de DOF (2002) y EPA (1998).

(Continuación Cuadro 41)

Parámetro	Unidades	Método	Invernadero	
			Valor	Interpretación*
Na	cmolc·kg ⁻¹	AS-12*	0.9	
K	cmolc·kg ⁻¹	AS-12*	0.9	Alto
Pb total	ppm		134	
Pb disponible	ppm	EPA 3051**	57.5	
CIC	cmolc·kg ⁻¹	AS-12*	18.1	Medio
P	mg·kg ⁻¹	Bray-1	58.5	Alto
DA	g·mL ⁻¹	Probeta	1.26	
CE	dS·m ⁻¹	AS-18*	0.51	Efecto nulo de salinidad

* NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002). ** EPA 3051 (EPA, 1998). Fuente: Elaboración propia con información de campo, análisis de laboratorio y datos de DOF (2002) y EPA (1998).

Sobre la concentración de EPT en suelo en comparación con límites permisibles (Cuadro 42), los resultados obtenidos muestran que el suelo y el sustrato cumplieron con la normatividad mexicana en cuanto a las concentraciones de EPT.

Cuadro 42. Concentración de EPT en el suelo comparado con los límites permisibles de la normatividad mexicana, canadiense y de la Comunidad Europea.

Parámetro (mg·kg ⁻¹)	Parcela 1	Parcela 2	México	Canadá	Comunidad Europea
Cobre	80	81	NA	63	100
Cadmio	1	1	37	1.4	3
Plomo	23	20	400	70	150
Cromo	92	81	280	64	150
Zinc	48	63	NA	250	300
Níquel	116	89	1600	45	90
Cobalto	18	21	NA	40	NA
Bario	295	283	5400	750	NA

Fuente: Elaboración propia con información de campo, análisis de laboratorio y datos de las normatividades mexicana (DOF, 2007), canadiense (CCME, 2007) y europea (UE, 2015a).

Sin embargo, al comparar los resultados obtenidos con la normatividad canadiense (CCME, 2007) y europea (UE, 2015a), se identificó que los valores máximos permitidos de la norma canadiense de EPT en suelo de cobre (63 mg·kg⁻¹ vs 80 y 81 mg·kg⁻¹), cromo (64 mg·kg⁻¹ vs 92 y 81 mg·kg⁻¹) y níquel (45 mg·kg⁻¹ vs 116 y 89 mg·kg⁻¹) son rebasados por las concentraciones de los mismos elementos identificados en las parcelas 1 y 2. Por su parte, la concentración de plomo del sustrato elaborado para el experimento en invernadero, superó el límite permisible según la normatividad canadiense (70 mg·kg⁻¹ vs 134 mg·kg⁻¹).

5.8 Efecto de las BPCV en el desarrollo del nopal

Al evaluar la capacidad fitoestabilizadora de Elementos Potencialmente Tóxicos de *Opuntia ficus-indica* cultivar Atlixco con y sin BPCV en suelo irrigado con aguas residuales no tratadas, se encontró que hubo efecto en el desarrollo vegetal según el tipo de cepa bacteriana inoculada. Para conocer el efecto de las BPCV en el desarrollo del nopal, se evaluaron las variables respuesta número y grosor de raquetas (mm), mediante un análisis estadístico de los valores obtenidos con la Prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$). El efecto de los tratamientos en el número de raquetas como en el resto de las medidas del grosor de cladodios de nopal verdura se presentan en los ANEXO B y C, respectivamente. Se hallaron diferencias estadísticamente significativas (Tukey $p \leq 0.05$) de la variable grosor del cladodio madre (GM) en nopal verdura inoculado con *Enterobacter* N9 (Cuadro 43). Esta variable fue la única que sistemáticamente mostró un efecto de los tratamientos estadísticamente significativo en el desarrollo del nopal verdura.

Cuadro 43. Efecto de los tratamientos en el grosor del cladodio madre de nopal verdura.

Tratamiento	GM (mm)			
	Parcela 1		Parcela 2	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
1 <i>Serratia</i> K120	34.68 ± 1.85 ab	34.89 ± 2.38 ab	35.10 ± 2.12 a	36.85 ± 2.60 a
2 <i>Serratia</i> MC119	35.15 ± 1.85 ab	33.09 ± 2.38 ab	25.18 ± 2.12 b	34.25 ± 2.60 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	31.69 ± 1.85 b	32.03 ± 2.38 b	37.08 ± 2.12 a	32.27 ± 2.60 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	30.30 ± 1.85 b	32.35 ± 2.38 ab	33.82 ± 2.12 ab	34.02 ± 2.60 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	40.72 ± 1.85 a	42.02 ± 2.38 a	35.85 ± 2.12 a	35.49 ± 2.60 a
6 Control	33.10 ± 1.86 ab	34.69 ± 2.39 ab	32.16 ± 2.13 ab	31.51 ± 4.51 a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo.

5.9 Biosorción de EPT en *Opuntia ficus-indica* cultivar Atlixco

El efecto de los tratamientos en las concentraciones de elementos esenciales y de plomo (elemento no esencial), en las muestras de nopal verdura inoculado con BPCV a cielo abierto (campo), se presentan por cada elemento y medición en el ANEXO D, a excepción del efecto de los tratamientos en la concentración de Pb en la Parcela 1 (Cuadro 44) y Zn en la Parcela 2 (Cuadro 45), donde se observan diferencias estadísticamente significativas conforme a la Prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$).

Cuadro 44. Efecto de los tratamientos en concentración de Pb de nopal a cielo abierto inoculado con BPCV.

Tratamiento	Pb (ppm)	
	Parcela 1	Parcela 2
1 <i>Serratia</i> K120	5.76 ± 2.42 b	
2 <i>Serratia</i> MC119	16.88 ± 2.42 a	
3 <i>Enterobacter</i> K131	15.14 ± 2.42 ab	No se detectó Pb
4 <i>Escherichia coli</i> N16	18.50 ± 2.42 a	
5 <i>Enterobacter</i> N9	14.62 ± 2.42 ab	
6 Control	13.24 ± 2.42 ab	

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo y análisis de laboratorio.

Cuadro 45. Efecto de los tratamientos en concentración de Zn de nopal a cielo abierto inoculado con BPCV.

Tratamiento	Zn (ppm)	
	Parcela 1	Parcela 2
1 <i>Serratia</i> K120	21.24 ± 2.36 a	24.16 ± 1.48 a
2 <i>Serratia</i> MC119	26.28 ± 2.36 a	18.26 ± 1.48 ab
3 <i>Enterobacter</i> K131	23.64 ± 2.36 a	19.38 ± 1.48 ab
4 <i>Escherichia coli</i> N16	27.00 ± 2.36 a	17.10 ± 1.48 b
5 <i>Enterobacter</i> N9	23.70 ± 2.36 a	15.90 ± 1.48 b
6 Control	24.48 ± 2.36 a	17.12 ± 1.48 b

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo y análisis de laboratorio.

La concentración de Pb presente en el nopal bajo cualquier tratamiento rebasó los límites permisibles establecidos tanto por el Codex Alimentarius (FAO/WHO, 2019), como por la normatividad de la Comunidad Europea (UE, 2021a) que es $< 0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ en ambos casos. Sin embargo, el análisis de la concentración de Pb reveló diferencias significativas (Tukey $p \leq 0.05$) de las plantas de nopal verdura inoculadas con *Serratia* K120 respecto de las demás cepas bacterianas y el control. Con la inoculación de *Serratia* K120, la concentración de Pb en el tejido vegetal de nopal verdura logró ser menor, lo cual es benéfico para propósitos alimentarios. Mientras tanto, con la inoculación de la BPCV *Escherichia coli* N16 se incrementó la acumulación de Pb en la parte aérea en mayor proporción con respecto a las demás cepas bacterianas y el control (Tukey $p \leq 0.05$).

Sobre la concentración de Zn, un elemento esencial para el desarrollo vegetal, la mayor concentración se obtuvo con la inoculación de *Serratia* K120 y la menor concentración con *Escherichia coli* N16 (Tukey $p \leq 0.05$), reafirmando la aptitud de *Serratia* K120 como cepa bacteriana para la promoción del crecimiento de nopal verdura en suelos irrigados con aguas residuales no tratadas.

Las concentraciones de elementos esenciales y de plomo (elemento no esencial) detectadas en las muestras de nopal verdura inoculado con BPCV en invernadero, se presentan en el Cuadro 46. Conforme a lo hallado por Hayek *et al.* (2017), el nopal se podría considerar un biomonitor de Pb, ya que se identificó que bioabsorbe este elemento tanto sembrado a cielo abierto como en invernadero; no obstante, esta capacidad se modifica en función del tipo de BPCV. Por su parte, Mendoza-Hernández *et al.* (2017) concluyeron que *Serratia* K120 incrementó la capacidad bioabsorbente de micronutrientes y macronutrientes en plantas de chícharo, calabaza y girasol, lo cual logró identificarse en el presente estudio sobre el incremento de la capacidad de bioabsorber Zn por nopal verdura (Tukey, $p \leq 0.05$).

Cuadro 46. Elementos en nopal inoculado con BPCV sembrado en sustrato con plomo en invernadero.

Tratamiento	Concentración de elementos (ppm)								
	Na	K	Fe	Cu	Mn	Pb	Zn	Ca	Mg
1 <i>Serratia</i> K120	754.7	56044.2	19.9	196.2	238.2	1.1	31.6	30128.4	16324.3
2 <i>Serratia</i> MC119	726.4	54511.5	66.6	308.2	189.9	19.9	23.3	36124.8	13684.9
3 <i>Enterobacter</i> K131	2055.8	50013.3	68.3	201.6	204.9	51.6	28.3	28915.3	14784.3
4 <i>Escherichia coli</i> N16	799.7	53978.4	56.6	246.5	221.5	21.6	28.3	26714.4	13445.6
5 <i>Enterobacter</i> N9	794.7	54894.7	89.9	253.2	176.6	23.3	26.6	30185.2	15456.9
6 Control	738	48114.1	23.3	199.9	239.9	3.3	18.3	26018.9	15823.4

Fuente: Elaboración propia con información de campo y análisis de laboratorio.

Opuntia ficus-indica cultivar Atlixco inoculado con la BPCV *Serratia* K120 (Tukey, $p \leq 0.05$), tiene efectos de fitoestabilización al disminuir la biodisponibilidad y la movilidad de Pb con lo que, de acuerdo con López-Martínez, Gallegos-Martínez, Pérez-Flores, & Gutiérrez-Rojas (2005) y Alvarado, Dasgupta-Schubert, Ambriz, Sánchez-Yañez, & Villegas (2011), podría impedir que este elemento se transfiera a capas subterráneas o a la atmósfera e inmovilizar el Pb en el suelo a través de las raíces.

VI. CONCLUSIONES

Al menos la mitad de los productores de nopal perciben remoto el riesgo de adquirir una enfermedad, por el uso agrícola de aguas provenientes del río Atoyac en la zona de riego en las localidades La Cantera y San Pablo Ahuatempan del municipio de Atlixco, y El Mirador del municipio de Santa Isabel Cholula, Puebla, debido a la contaminación del agua que fluye por los canales de riego y consideran invisibles los procesos por los que esto podría causar enfermedades y daños.

No se presentó asociación estadísticamente significativa (Prueba Exacta de Fisher $p \leq 0.05$) entre la percepción de afectación de la contaminación del agua en la salud de los habitantes de la zona de riego con el sexo, escolaridad y antigüedad de los productores, excepto por dos asociaciones: la asociación entre la percepción de afectación al sistema inmune por contaminación y su escolaridad, donde todos los que indicaron afectaciones al sistema inmune contaban con nivel secundaria; así como la asociación entre el desconocimiento sobre la percepción de afectación a la salud y su sexo, donde todos los productores que indicaron no saber si la contaminación del agua afecta fueron hombres, por lo que la concientización sobre el problema de la contaminación puede dirigirse especialmente a los productores que cuentan con nivel primaria y a los hombres.

Se presentó asociación estadísticamente significativa (Prueba Exacta de Fisher $p \leq 0.05$) entre la antigüedad y la percepción del grado de contaminación del agua de riego cerca del canal general próximo al Jagüey, y de los canales secundarios (después del Jagüey) que conducen el agua a las parcelas, donde a mayor antigüedad la percepción de contaminación fue mayor, pero no se presentó asociación sobre la percepción de la contaminación en el canal general cerca de la Central Hidroeléctrica Portezuelo I, donde sin distinción de antigüedad, opinaban que había un cierto grado de contaminación. Esto indica la posibilidad del incremento de la contaminación y de su dispersión en la zona de riego conforme el paso del tiempo.

Por su parte, los resultados del análisis físico y químico muestran que las concentraciones de EPT en agua y suelo rebasan los límites permisibles de la normatividad canadiense, pero aún no se encuentran por encima de los límites máximos permisibles de la normatividad mexicana vigente en el sitio de estudio. Sin embargo, el agua cuenta con una alta contaminación de grasas y aceites, así como de coliformes fecales y totales, agravándose en tiempo de estiaje, por ello, es

necesario generar estrategias de prevención dado el riesgo de polución latente. En cuanto a la concentración de EPT disponibles extraídos con DTPA en suelo, se determinó que es adecuada para los metales Fe, Cu, Mn y Zn, mientras que es normal para Pb, Cd y Ni en las cuatro parcelas, de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002). Sin embargo, la concentración de cobre, cromo y níquel rebasan los límites permisibles de la norma canadiense y europea, lo que puede afectar el desarrollo de las especies vegetales que son cultivadas en la zona.

En este sentido, la inoculación de BPCV se planteó como estrategia para mitigar los efectos producidos por la contaminación con EPT, en el sistema agrícola y promover el desarrollo de nopal verdura, ampliamente cultivado en la zona de estudio. Así, se encontraron diferencias estadísticamente significativas (Tukey $p \leq 0.05$) al analizar el grosor del cladodio madre en nopal verdura inoculado con la BPCV *Enterobacter* N9. Con ello, se comprobó que al menos una cepa de BPCV, *Enterobacter* N9, incrementó el crecimiento de *Opuntia ficus-indica* en las dos parcelas de riego aún en presencia de EPT. Asimismo, se identificó que la inoculación de *Serratia* K120 reduce la concentración de Pb en el cladodio cosechable de nopal verdura, y aumenta la concentración de Zn con diferencias estadísticamente significativas (Tukey $p \leq 0.05$) respecto de las plantas inoculadas con las demás cepas y el control.

La disminución y eliminación de Pb en el tejido vegetal de nopal verdura es benéfica con fines alimentarios, ambientales, de comercialización y de salud humana. Los suelos que son irrigados constantemente con aguas no tratadas son susceptibles de ser contaminados con EPT, por lo que los productores eventualmente podrían verse afectados al disminuir la productividad de sus parcelas, al ser rechazado su producto por no cumplir con la normatividad aplicable a los alimentos que se comercializan o al bioacumular en su organismo EPT, por la ingesta del nopal verdura.

Es posible contribuir en la disminución del impacto negativo de la contaminación ambiental por EPT, ayudando en la propiciación de cambios conductuales de los actores involucrados al informar sobre los resultados obtenidos por el análisis de agua, suelo y material vegetal y ofrecer estrategias de formación para el manejo de su sistema de cultivo, como la inoculación de BPCV tomando en cuenta la percepción del riesgo de los productores ante la contaminación del agua de riego.

VII. LITERATURA CITADA

- Alcántar, G., Trejo-Téllez, L. I., Fernández, L., & Rodríguez M. N. (2013). Capítulo 2: Elementos esenciales. En: G. Alcántar & L. I. Trejo-Téllez (eds). *Nutrición de cultivos* (pp. 8-47). Colegio de Postgraduados. (1a ed.).
- Altieri, M. A. (1987). *Agroecology. The Scientific Basis of Alternative Agriculture*. Westview Press.
- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2000). *Agroecología: Teoría y práctica para una agricultura sostenible. Serie de textos básicos para la formación ambiental*. ONU-PNUMA.
- Alvarado, C. J., Dasgupta-Schubert, N., Ambriz, E., Sánchez-Yañez, J. M., & Villegas, J. (2011). Hongos micorrízicos arbusculares y la fitorremediación de plomo. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 27(4), pp. 357-364. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992011000400008&lng=es&tlng=es.
- Aragonés, J. I., Tapia-Fonllem, C., Poggio, L., & Fraijo-Sing, B. (2017). Perception on the Risk of the Sonora River Pollution. *Sustainability*, 9(2), pp. 1-11. doi: <https://doi.org/10.3390/su9020263>.
- Arba, M., Falisse, A., Choukr-Allah, R., & Sindic, M. (2017). Biology, Flowering and Fruiting of the Cactus *Opuntia* spp.: A Review and Some Observations on Three Varieties in Morocco. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 60, e17160568, pp. 1-11. doi: <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2017160568>.
- Arellano, E., Camarena, L., Von, C., & Daesslé, W. (2009). Percepción del riesgo en salud por exposición a mezclas de contaminantes: el caso de los valles agrícolas de Mexicali y San Quintín, Baja California, México. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 27(3), pp. 291-301. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-386X2009000300006&lng=en&tlng=es.
- Arnon, D. I., & Stout, P. R. (1939). The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. *Plant Physiology*, 14(2), pp. 371-375. doi: <https://doi.org/10.1104/pp.14.2.371>
- Arreguin-Cortes, F. I., Saavedra-Horita, J. R., Rodriguez-Varela, J. M., Tzatchkov, V. G., Cortez-Mejia, P. E., Llaguno-Guilberto, O. J., & Sainos-Candelario, A. (2020). State level water security indices in Mexico. *Sustainable Earth*, 3(9), pp. 1-14. doi: <https://doi.org/10.1186/s42055-020-00031-4>
- Ayala-Mendivil, N. D., Ochoa-Jiménez, S., & Jacobo-Hernández, C. A. (2017). La dimensión familia en la organización: estudio de caso en una MiPyMES familiar. *Investigación administrativa*, 46(2), pp. 1-24. doi: <https://doi.org/10.35426/iav46n120.04>.
- Bakhtsiyarava, M., & Nawrotzki, R. J. (2017). Environmental inequality and pollution advantage among immigrants in the United States. *Applied Geography*, 81, pp. 60-69. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.02.013>

- Bañuelos, G. S., & Lin, Z. Q. (2010). Cultivation of the Indian fig *Opuntia* in selenium-rich drainage sediments under field conditions. *Soil Use and Management*, 26(2), pp. 167-175. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00258.x>
- Barber, J. S., Biddlecom, A. E., & Axinn, W. G. (2003). Neighborhood Social Change and Perceptions of Environmental Degradation. *Population and Environment*, 25(2), pp. 77-108. <https://www.jstor.org/stable/27503871>
- Barbosa-Moreno, F., Fernández-Reynoso, D. S., Rubio-Granados, E., Sánchez-Cohen, I., & Contreras-Hinojosa, J. R. (2016). Dinámica del agua de lluvia en árboles de selva baja caducifolia. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7(5), pp. 1179-1188. <https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas/article/view/241/202>
- Barka, N., Abdennouri, M., Makhfouk, M. E., & Qourzal, S. (2013). Biosorption characteristics of cadmium and lead onto eco-friendly dried cactus (*Opuntia ficus indica*) cladodes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1(3), pp. 144-149. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.04.008>.
- Bertalanffy, L. (1987). *Teoría General de los Sistemas*. Fondo de Cultura Económica.
- Blanco, Y., & Leyva, Á. (2007). Las arvenses en el agroecosistema y sus beneficios agroecológicos como hospederas de enemigos naturales. *Cultivos Tropicales*, 28(2), pp. 21-28. doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10964.19844>
- Boletín Oficial del Estado (BOE). (2002). *Ley 5/2002, de 3 de junio, sobre vertidos de aguas residuales industriales a los sistemas públicos de saneamiento*. <https://www.boe.es/eli/es-as/l/2002/06/03/5>
- Bonilla, M. N., Ayala-Osorio, A. I., González-Contreras, S., Santamaría-Juárez, J. D., & Silva-Gómez, S. E. (2015). Calidad fisicoquímica del agua del distrito de riego 030 “Valsequillo” para riego agrícola. *Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa*, 2(4), pp. 1-29. <https://www.pag.org.mx/index.php/PAG/article/view/371/410>
- Bustamante-González, Á., Galindo-De Jesús, G., Jaramillo-Villanueva, J. L., & Vargas-López, S. (2016). Percepción de la contaminación del Río Tlapaneco por la población ribereña. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 13(1), pp. 47-62. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-54722016000100047&lng=es&tlng=es.
- Calvo, M. C. (2019). Pensamiento complejo y transdisciplina. *Sophia, Colección de Filosofía de la Educación*, 26(1), pp. 307-326. doi: <https://doi.org/10.17163/soph.n26.2019.09>
- Campuzano, C., Hansen, A. M., De Stefano, L., Martínez-Santos, P., Torrente D., & Willaarts, B.A. (2014). Water resources assessment, En B. A. Willaarts, A. Garrido, M. R. Llamas (eds.), *Water for Food and Wellbeing in Latin America and the Caribbean. Social and Environmental Implications for a Globalized Economy*. (pp. 27-53). Routledge, Oxon and New York.

- Carrillo-González, R., Perea-Vélez, Y. S., & González-Chávez, M. C. A. (2017). Fitorremediación Asistida Con Enmiendas y Fitoestabilización de Elementos Potencialmente Tóxicos. *Agroproductividad*, 10(4), pp. 15-20. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/990>
- Carrillo-Huerta, M. M., & Gómez-Bretón, E. (2020). La tecnología en el uso sostenible del agua para riego en México. El caso del acuífero de Tecamachalco, Puebla, 2017. *Panorama económico*, 15(30), pp. 27-56. doi: <https://doi.org/10.29201/pe-ipn.v15i30.250>
- Casiano, M., & Paz, F. (2018). Patrones espectrales de la fenología del desarrollo vegetativo y reproductivo de árboles de huizache (*Acacia farnesiana* (L.) Willd.). *Terra Latinoamericana*, 36(4), pp. 393-409. doi: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i4.417>
- Catalán-Vázquez, M., Riojas-Rodríguez, H., Jarillo-Soto, E. C., & Delgadillo-Gutiérrez, H. J. (2009). Percepción de riesgo a la salud por contaminación del aire en adolescentes de la Ciudad de México. *Salud Pública de México*, 51(2), pp. 148-156. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0036-36342009000200011&lng=es&tlng=es.
- Caviedes, D. I., Muñoz, R. A., Perdomo, A., Rodríguez, D., & Sandoval, I. J. (2015). Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. *Revista Ingeniería y Región*. 13(1), pp. 73-90. doi: <https://doi.org/10.25054/22161325.710>
- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). (1997a). *Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health. Arsenic*. <https://ccme.ca/en/res/arsenic-inorganic-canadian-soil-quality-guidelines-for-the-protection-of-environmental-and-human-health-en.pdf>
- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). (1997b). *Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health. Chromium*. <https://ccme.ca/en/res/chromium-canadian-soil-quality-guidelines-for-the-protection-of-environmental-and-human-health-en.pdf>
- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). (1997c). *Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health. Vanadium*. <https://ccme.ca/en/res/vanadium-canadian-soil-quality-guidelines-for-the-protection-of-environmental-and-human-health-en.pdf>
- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). (1999a). *Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health. Copper*. <https://ccme.ca/en/res/copper-canadian-soil-quality-guidelines-for-the-protection-of-environmental-and-human-health-en.pdf>
- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). (1999b). *Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health. Cadmium*. <https://ccme.ca/en/res/cadmium-canadian-soil-quality-guidelines-for-the-protection-of-environmental-and-human-health-en.pdf>

- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). (1999c). *Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health. Lead*. <https://ccme.ca/en/res/lead-canadian-soil-quality-guidelines-for-the-protection-of-environmental-and-human-health-en.pdf>
- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). (1999d). *Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health. Mercury*. <https://ccme.ca/en/res/mercury-inorganic-canadian-soil-quality-guidelines-for-the-protection-of-environmental-and-human-health-en.pdf>
- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). (2007). *Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health. Summary Tables*. https://www.esdat.net/environmental%20standards/canada/soil/rev_soil_summary_tbl_7.0_e.pdf
- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). (2009). *Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health. Selenium*. <https://ccme.ca/en/res/selenium-canadian-soil-quality-guidelines-for-the-protection-of-environmental-and-human-health-en.pdf>
- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). (2013). *Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health. Barium*. <https://ccme.ca/en/res/barium-canadian-soil-quality-guidelines-for-the-protection-of-environmental-and-human-health-en.pdf>
- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). (2015). *Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health. Nickel*. <https://ccme.ca/en/res/nickel-canadian-soil-quality-guidelines-for-the-protection-of-environmental-and-human-health-en.pdf>
- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). (2018). *Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health. Zinc*. <https://ccme.ca/en/res/zinc-canadian-soil-quality-guidelines-for-the-protection-of-environmental-and-human-health-en.pdf>
- Comunidades Europeas Diario Oficial (CE). (2006). *Directiva 2006/11/CE del parlamento europeo y del consejo de 15 de febrero de 2006 relativa a la contaminación causada por determinadas sustancias peligrosas vertidas en el medio acuático de la Comunidad*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006L0011&from=ES>
- Comunidades Europeas Diario Oficial (CE). (2008). *Directiva 2008/105/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2008, relativa a las normas de calidad ambiental en el ámbito de la política de aguas, por la que se modifican y derogan ulteriormente las Directivas 82/176/CEE, 83/513/CEE, 84/156/CEE, 84/491/CEE y 86/280/CEE del Consejo, y por la que se modifica la Directiva 2000/60/CE*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0105&from=es>
- Comunidad Europea/Unión Europea Diario Oficial (CE/UE). (2002). *Reglamento (CE) No 221/2002 De La Comisión de 6 de febrero de 2002 por el que se modifica el Reglamento*

- (CE) no 466/2001 por el que se fija el contenido máximo de determinados contaminantes en los productos alimenticios. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002R0221&from=ES>
- Comunidades Europeas/Unión Europea Diario Oficial (CE/UE). (2005). *Reglamento (CE) No 78/2005 De La Comisión de 19 de enero de 2005 por el que se modifica el Reglamento (CE) no 466/2001 en lo referente a los metales pesados*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32005R0078&from=ES>
- Comunidades Europeas/Unión Europea Diario Oficial (CE/UE). (2006). *Reglamento (CE) No 1881/2006 De La Comisión de 19 de diciembre de 2006 por el que se fija el contenido máximo de determinados contaminantes en los productos alimenticios*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006R1881&from=ES>
- Comunidades Europeas/Unión Europea Diario Oficial (CE/UE). (2008). *Reglamento (CE) No 629/2008 De La Comisión de 2 de julio de 2008 que modifica el Reglamento (CE) no 1881/2006 por el que se fija el contenido máximo de determinados contaminantes en los productos alimenticios*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008R0629&from=ES>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (1989). *Acuerdo por el que se establecen los criterios ecológicos de calidad del agua*. CE-CCA-001/89. Centro De Calidad Ambiental (CECCA). https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4837548&fecha=13/12/1989#gsc.tab=0
- Cervantes, J., Gallegos-Vázquez, C., Reyes, J. A., & Fernández, M. R. (2005). Mexican Cultivars of *O. ficus-indica* (L.) Mill. with Economic Importance. *Acta Horticulturae*, 728(2), pp. 29-36. doi: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.728.2>
- Chaboussou, F. (1987). *Plantas doentes pelo uso de agrotóxicos (A teoria da trofobiose) (Plantas enfermas por el uso de agrotóxicos: la teoría de la trofobiosis)*. L&PM Editores.
- Chen, Y., Juang, Y., Huang, H., Mou, L., Ru, J., Zhao, J., & Xiao, S. (2018). Long-term and high-concentration heavy-metal contamination strongly influences the microbiome and functional genes in Yellow River sediments. *Science of The Total Environment*, 637–638, pp. 1400-1412. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.109>
- Choudhary, M., Ray, M. B., & Neogi, S. (2019). Evaluation of the potential application of cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a bio-coagulant for pre-treatment of oil sands process-affected water. *Separation and Purification Technology*, 209(31), pp. 714-724. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.09.033>.
- Compant, S., Samad, A., Faist, H., & Sessitsch, A. (2019). A review on the plant microbiome: Ecology, functions, and emerging trends in microbial application. *Journal of Advanced Research*, 19, pp. 29-37. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jare.2019.03.004>
- Corrales-Ramírez, L. C., Sánchez-Leal, L. C., & Quimbayo-Salamanca, M. E. (2018). Microorganismos potencialmente fitopatógenos en aguas de riego proveniente de la cuenca media del río Bogotá. *NOVA*, 16(29), pp. 71- 89. <http://www.scielo.org.co/pdf/nova/v16n29/1794-2470-nova-16-29-00071.pdf>

- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., & Robledo, C.W. (2014). *InfoStat versión 2014. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina*. <http://www.infostat.com.ar>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (1997). *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. México*. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4863829&fecha=06/01/1997#gsc.tab=0
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis*. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=717582&fecha=31/12/2002#gsc.tab=0
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2007). *Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 que establece los criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. México*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4964569&fecha=02/03/2007#gsc.tab=0
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2006). *Norma Mexicana NMX-FF-068-SCFI-2006, hortaliza fresca-nopal verdura (Opuntia spp.)-especificaciones (cancela a la NMX-FF-068-1988)*. <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2007/nmx-ff-068-scfi-2006.pdf>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2009). *Proyecto De Norma Mexicana PROY-NMX-AA-003/1-SCFI-2008. Aguas Residuales – Muestreo. (Todas las partes cancelan al PROY NMX-AA-003-SCFI-2006). Water analysis. Residual water sampling. Parte I. Guía para el diseño de programas de muestreo y técnicas de muestreo*. <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2009/proy-nmx-aa-003-1-scfi008.pdf>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2011). *Declaratoria de clasificación de los ríos Atoyac y Xochiac o Hueyapan, y sus afluentes*. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5199672&fecha=06/07/2011#gsc.tab=0
- Eaton, A. D., Clesceri, L. S., Rice, E. W., & Greenberg, A. E. (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. (21a ed.). Centennial Edition.
- Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA). (2019). *Encuesta Nacional Agropecuaria. Datos Abiertos*. https://www.inegi.org.mx/programas/ena/2019/#Datos_abiertos
- Environment Canada. (2000). *Final Report – Proposed Approach for Wastewater Effluent Quality Framework and Guidelines for Federal Facilities*. <https://www.publicsafety.gc.ca/lbrr/archives/cd-318-6-gl-eng.pdf>
- Environmental Protection Agency (EPA). (1996). *Method 3052 Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices*. 20 p. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/3052.pdf>

- Environmental Protection Agency (EPA). (1998). *Method 3051 Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils*. 24 p. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/3051a.pdf>
- Espinosa-Alzate, J., León-Sicard, T., & Ríos-Osorio, L. (2015). Tipología y usos del suelo en agroecosistemas del Valle del Guamuez, Putumayo – Colombia. *Sociedade & Natureza*, 27(2), pp. 255-265. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1982-451320150205>
- Esquivel-Cote, R., Gavilanes-Ruiz, M., Cruz-Ortega, R., & Huante, P. (2013). Importancia agrobiotecnológica de la enzima ACC desaminasa en rizobacterias, una revisión. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(3), pp. 251 – 258. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802013000300010&lng=es&tlng=es
- Esquivel-Ferriño, P. C, Cantú-Cárdenas, L. G., & González-Santiago, O. (2018). Perception of air and water pollution and its association with cancer risk perception in a region with high cancer mortality in Mexico. An exploratory study. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34(2), pp. 347-353. doi: <https://doi.org/10.20937/rica.2018.34.02.14>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations/United Nations Environment Programme (FAO/UNEP). (2021). *Global assessment of soil pollution*: doi: <https://doi.org/10.4060/cb4894en>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2018). *Ecología Del Cultivo, Manejo Y Usos Del Nopal*. <https://www.fao.org/3/i7628es/I7628ES.pdf>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations/ World Health Organization (FAO/WHO). (2019). *Codex Alimentarius. Normas Internacionales de Alimentos*. www.codexalimentarius.org
- Food and Agriculture Organization of the United Nations/ World Health Organization (FAO/WHO). (1993). *Codex Stan 185-1993, Fresh fruits and vegetables. Codex Standard for Nopal*. <https://www.fao.org/3/a1389e/a1389e00.pdf>
- Farhadkhani, M., Nikaeen, M., Yadegarfar, G., Hatamzadeh, M., Pourmohammadbagher, H., Sahbaei, Z., & Rahmani, H. R. (2018). Effects of irrigation with secondary treated wastewater on physicochemical and microbial properties of soil and produce safety in a semi-arid area. *Water Research*, 144, pp. 356-364. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.047>
- Fasciolo, G. Meca, M. L., Calderón, E., & Rebollo, M. (2005). Contaminación microbiológica en ajos y suelos regados con efluentes domésticos tratados. Mendoza, Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo*, 37(1), pp. 31-40. https://bdigital.uncuyo.edu.ar/objetos_digitales/1265/fascioloagrarias1-05..pdf
- Faviel-Cortez, E., Infante-Mata, D., & Molina-Rosales, D. O. (2019). Percepción y calidad de agua en comunidades rurales del área natural protegida la Encrucijada, Chiapas, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(2), pp. 317-334. doi: <https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.02.05>

- Ferreira, D., Navoni, J., Araújo, A. L., & Amaral, V. (2020). Risk perception of populations in Northeastern Brazil about domestic sewage treatment and reuse. *Ambiente & Sociedade*, 23, pp. 1-18. doi: <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20180098r1vu2020L4AO>
- Fox, D. I., Pichler, T., Yeh, D. H., & Alcantar, N. A. (2012). Removing Heavy Metals in Water: The Interaction of Cactus Mucilage and Arsenate (As (V)). *Environmental Science & Technology* 46(8), pp. 4553-4559. doi: <https://doi.org/10.1021/es2021999>
- Freire-Vinueza, C., Meneses, K., & Cuesta, G. (2021). América Latina ¿Un paraíso de la contaminación ambiental? *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(2), pp. 1-18. doi: <https://doi.org/10.15359/rca.55-2.1>
- Freitas, C., Oliveira, S., Schütz, G., Freitas, M., & Camponovo, M. P. (2007). Ecosystem approaches and health in Latin America. *Cadernos de Saúde Pública*, 23(2), pp. 283-296. doi: <https://doi.org/10.1590/S0102-311X2007000200004>
- García-Céspedes, D., Lima-Cazorla, L. A., Ruiz-Gutierrez, L., Santana-Romero, J. L., & Calderón-Peñalver, P. A. (2016). Agroecosistemas con probables riesgos a la salud por contaminación con metales pesados. *Revista Cubana de Química*, 28(1), pp. 378-393. <http://scielo.sld.cu/pdf/ind/v28n1/ind04116.pdf>
- Gómez-Martínez, M. J., Gutiérrez-Montes, I., & Declerck, F. (2014). *Percepción local acerca de la calidad del agua y la herpetofauna en fincas ganaderas del municipio de Matiguás, Nicaragua*. Luna Azul.
- González-García, H., Salazar-Cantú, J. J., & Rodríguez-Guajardo, R. C. (2012). Contaminación como uno de los determinantes de la migración: Evidencia para México. *Economía mexicana. Nueva época*, 21(1), pp. 69-92. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-20452012000100003&lng=es&tlng=es.
- González-Chávez, M. C. A., Carrillo-González, R., Sánchez-López, A. S., & Ruiz-Olivares, A. (2017). Alternativas de fitorremediación de sitios contaminados con elementos potencialmente tóxicos. *Agroproductividad*. 10(4), pp. 8-14. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/988>
- Handal, A., Rodríguez, Y., Carcaño, M., López, L., Morán, C., & Morán, J. (2015). Microbial contamination of water Atoyac River Watershed in the State Reserve the Sierra Tentzo, Puebla Mexico. *Toxicology Letters*, 238(2) Supplement, pp. S90. doi: <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2015.08.301>.
- Hayek, E. E., Samrani, A. E., Lartiges, B., Kazpard, V., & Aigouy, T. (2017). Lead bioaccumulation in *Opuntia ficus-indica* following foliar or root exposure to lead-bearing apatite. *Environmental Pollution*, 220(B), pp. 779-787. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.10.046>.
- Hernández, B. E., Ruiz, A. M., Ramírez, V., Sandoval, S. J., & Dávila, M. (2020). Análisis económico de productores y comercializadores de nopal en el Valle de Teotihuacán.

Revista Iberoamericana de Contaduría, Economía y Administración, 9(17), pp. 1-37. doi: <https://doi.org/10.23913/ricea.v9i17.147>

Hernández-Acosta, E., Quiñones-Aguilar, E. E., Cristóbal-Acevedo, D., & Rubiños-Panta, J. E. (2014). Calidad biológica de aguas residuales utilizadas para riego de cultivos forrajeros en Tulancingo, Hidalgo, México. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 20(1), pp. 89-100. doi: <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.03.024>

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). (2017). *Caracterización del SIAL nopal verdura y fruta en el estado de Hidalgo, México*. <http://repositorio.iica.int/handle/11324/6321>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2003). *Canícula. Escala 1:1 000 000. Datum ITRF92. estados Unidos Mexicanos*. <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/#Descargas>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2004). *Evapotranspiración. Escala 1:1 000 000. Datum ITRF92. estados Unidos Mexicanos*. <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/#Descargas>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2005a). *Guía para la Interpretación de Cartografía Climatológica*.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2005b). *Humedad suelo. Escala 1:1 000 000. Datum ITRF92. estados Unidos Mexicanos*. <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/#Descargas>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2006). *Precipitación media anual. Escala 1:1 000 000. Datum ITRF92. estados Unidos Mexicanos*. <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/#Descargas>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2007). *Temperatura media anual. Escala 1:1 000 000. Datum ITRF92. estados Unidos Mexicanos*. <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/#Descargas>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2008). *Unidades climáticas. Escala 1:1 000 000. Datum ITRF92. estados Unidos Mexicanos*. <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/#Descargas>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2013). *Erosión del suelo de México Serie I*. https://idegeo.centrogeo.org.mx/layers/geonode%3Aerosion2014_gw84

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2019). *Cuenca hidrológica Alto Atoyac: humedales: informe técnico. 1. Alto Atoyac, Cuenca (México, estado) - Hidrografía – Informes*.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2022a). *Diccionario de datos topográficos: escala 1:50 000*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/889463904410.pdf

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2022b). *Censo de Población y Vivienda 2020. Principales resultados por localidad (ITER) 2020*. <https://www.inegi.org.mx/app/scitel/consultas/index>
- Islas-García, A., Peralta-Rodríguez, M., Vega-Loyo, L., López-Aguilar, R., & Rodríguez-Vázquez, R. (2016). Biorremediación por bioestimulación y bioaumentación con microorganismos nativos de un suelo agrícola contaminado con hidrocarburos. *Biotecnología y Sustentabilidad*, *1*(1), pp. 82-85. <https://revistas.uaz.edu.mx/index.php/biotecnologiaysust/article/view/175/168>
- Jacobo-García, F. R. (2018). Aguas residuales urbanas y sus efectos en la comunidad de Paso Blanco, municipio de Jesús María, Aguascalientes. *Revista de El Colegio de San Luis*, *8*(16), pp. 267-293. doi: <https://doi.org/10.21696/rcsl9162018760>
- Jacques, R. J. S., Okeke, B. C., Bento, F. M., Teixeira, A. S., Peralba, M. C. R., & Camargo, F. A.O. (2008). Microbial consortium bioaugmentation of a polycyclic aromatic hydrocarbons contaminated soil. *Bioresource Technology*, *99*, 2637–2643. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.04.047>
- Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F., & Schuman G. E. (1997). Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, *61*(1), 4-10. doi: <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x>
- Kumar, K., Singh, D., & Singh, R.S. (2018). *Cactus pear: cultivation and Uses*. Technical Bulletin No. 73. ICAR. Central Institute for Arid Horticulture. https://ciah.icar.gov.in/publication/Technical_bulletin/2018/cactus-pear.pdf
- Londoño-Franco, L. F., Londoño-Muñoz, P. T., & Muñoz-García, F. G. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, *14*(2), pp. 145-153. doi: [https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)145-153).
- Lopes, M. N., Cândido, M. J. D., Silveira, W. M., Maranhão, T. D., Soares, I., Pompeu, R. C. F. F., Silva, R. G. da, & Carneiro, M. S. (2018). Accumulation and export of nutrients in cactus pear cladodes (*Opuntia ficus-indica*) under different managements in the Brazilian Semiarid. *Revista Brasileira de Zootecnia*, *47*, e20170077, pp. 1-11. doi: <https://doi.org/10.1590/rbz4720170077>
- López-Martínez, S., Gallegos-Martínez, M. E., Pérez-Flores, L. J., & Gutiérrez-Rojas, M. (2005). Mecanismos de fitorremediación de suelos contaminados con moléculas orgánicas xenobióticas. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, *21*(2), pp. 91-100. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992005000200091&lng=es&tlng=es
- Maki-Díaz, G., Peña-Valdivia, C. B., García-Nava, R., Arévalo-Galarza, M. L., Calderón-Zavala, G., & Anaya-Rosales, S. (2015). Características físicas y químicas de nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) para exportación y consumo nacional. *Agrociencia*, *49*(1), pp. 31-51. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952015000100003&lng=es&tlng=es

- Mancilla-Villa, O. R., Ortega-Escobar, H. M., Ramírez-Ayala, C., Uscanga-Mortera, E., Ramos-Bello, R., & Reyes-Ortigoza, A. L. (2012). Metales pesados totales y arsénico en el agua para riego de Puebla y Veracruz, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(1), pp. 39-48. <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/29704>
- Marcelino-Aranda, M., Torres-Ramírez, A., Muñoz-Marcelino, D., & Camacho, A. D. (2020). Profesionalización en la Empresa Familiar: Evolución y líneas de investigación. *Nova scientia*, 12(2), pp. 1-32. doi: <https://doi.org/10.21640/ns.v12i25.2508>
- Márquez-Berber, S. R., Torcuato-Calderón, C., Almaguer-Vargas, G., Colinas-León, M. T., & Khalil-Gardezi A. (2012). El sistema productivo del nopal tunero (*Opuntia albicarpa* y *O. megacantha*) en Axapusco, estado de México: Problemática y alternativas. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 18(1), pp. 81-93. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027-152X2012000100006&lng=es&tlng=es
- Martínez, Z., González, M. S., Paternina, J., & Cantero, M. (2017). Contaminación de suelos agrícolas por metales pesados, zona minera El Alacrán, Colombia. *Temas Agrarios*, 22(2), pp. 20-32. doi: <https://doi.org/10.21897/rta.v22i2.941>
- Mendoza, J. C., Perea, Y. S., Arriola, J., Martínez, S. M., & Pérez, G. (2016). Assessing the effects of heavy metals in ACC deaminase and IAA production on plant growth promoting bacteria. *Microbiological Research*, 188-189, pp. 53-61. doi: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2016.05.001>
- Mendoza-Escalona, B., Torres-Rodríguez, D. Marcó, L. M., Gómez, C.; Estanga-Barrios, M., & García-Orellana, Y. (2021). Concentración de metales pesados en suelos agrícolas bajo diferentes sistemas de labranza. *TecnoLógicas*, 24(51), e1738, pp. 1-12. doi: <https://doi.org/10.22430/22565337.1738>
- Mendoza-Hernández, J. C., Castillo-Morales, M., García-Grijalva, B. L., Muñoz-González, I., Arriola-Morales, J., Vega-Hernández, M., & Pérez-Osorio, G. (2017). Evaluación en el crecimiento y nutrición de las plantas de chícharo (*Pisumsativum*), calabaza (*Cucurbita pepo*) y girasol (*Helianthus annuus*) inoculadas con BPCV. *Journal of Agriculture and Environmental Sciences*, 6(2), pp. 42-53. doi: <https://doi.org/10.15640/jaes.v6n2a6>
- Mendoza-Orozco, M. E., Morales-Flores, F. J., & Méndez-Gallegos, S. J. (2019). Tipología de productores de nopal tunero en Pinos, Zacatecas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(spe22), pp. 77-88. doi: <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i22.1860>
- Merleau-Ponty, M. (1975). *Fenomenología de la percepción*. Col. Historia, ciencia, sociedad, No. 121. Península.
- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (2003). *Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y Criterios de Remediación para Suelos Contaminados*. <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6078/39/LIBRO%20VI%20Anexo%202%20Remediacion%20de%20suelos.pdf>

- Miretzky, P., Muñoz, C., & Carrillo-Chávez, A. (2008). Experimental binding of lead to a low cost on biosorbent: Nopal (*Opuntia streptacantha*). *Bioresource Technology*, 99(5), pp. 1211-1217. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.02.045>
- Morales, H. (2012). *Orígenes de la industria eléctrica en Puebla. México. "La Hidroeléctrica de El Portezuelo. 1899-1910"* Simposio Internacional Globalización, innovación y construcción de redes técnicas urbanas en América y Europa, 1890-1930. Brazilian Traction, Barcelona Traction y otros conglomerados financieros y técnicos. Universidad de Barcelona, Facultad de Geografía e Historia.
- Morales-García, S. S., Jonathan, M. P., & Rodríguez-Espinosa, P. F. (2014). *Degree of Pollution in Water and Sediments of As, Cd, Cr, Cu, Pb and Zn in Valsequillo Dam, Puebla City, México*. (3a ed.). International Conference on Geological and Environmental Sciences IPCBEE. IACSIT Press, Singapore, 73. 10, 45-49. doi: <https://doi.org/10.7763/IPCBEE>.
- Morales-García, S. S., Rodríguez-Espinosa, P. F., & Jonathan, M. P. (2012). *Environmental Assessment and Sustainable Development of Valsequillo in Puebla, Mexico*. International Conference on Environmental Science and Technology IPCBEE. IACSIT Press, Singapore, 30, 113-117. http://www.ipcbee.com/vol30/023--ICEST2012_N30011.pdf
- Morales-García, S. S., Rodríguez-Espinosa, P. F., Shruti, V. C., Jonathan, M.P., & Martínez-Tavera, E. (2017). Metal concentrations in aquatic environments of Puebla River basin, Mexico: natural and industrial influences. *Environmental Science and Pollution Research*. 24(3), pp. 2589-2604. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8004-3>
- Morin, E. (2007). *La cabeza bien puesta. Repensar la reforma. Reformar el pensamiento*. (1a ed.). Nueva Visión.
- Neri, E. (2008). *Efectos ambientales en la agricultura por el uso de aguas residuales del canal Chilhuacán, Atlixco, Pue*. Postgrado de Estrategias para el Desarrollo Agrícola Regional. Colegio de Postgraduados. Tesis de Maestría. 185 p.
- Nharingo, T., & Moyo, M. (2016). Application of *Opuntia ficus-indica* in bioremediation of wastewaters. A critical review. *Journal of Environmental Management*, 166(15), pp. 55-72. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.10.005>
- Nobel, P. S., & Castañeda, M. (1998). Seasonal, Light, and Temperature Influences on Organ Initiation for Unrooted Cladodes of the Prickly Pear Cactus *Opuntia ficus-indica*. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 123(1), pp. 47-51. doi: <https://doi.org/10.21273/JASHS.123.1.47>
- Ocampo, I. (1997). XII. Niveles organizativos para el manejo de aguas en el valle de Atlixco. En: Tomás Martínez Saldaña y Jacinta Palerm Viqueira (eds.). *Antología sobre pequeño riego [vol. I]*. Colegio de Postgraduados. ISBN 968 839 229 4. 427-463.
- Ocampo, I. (2004). *Gestión del agua y sustentabilidad de los sistemas de pequeño riego. El caso del Canal San Félix, Atlixco, México*. Instituto de Sociología y Estudios Jornaleros. Universidad de Córdoba. Tesis de Doctorado. 550 p.

- Olvera, I. (2017). *Efectos del agua tratada, en el suelo y cultivos agrícolas: caso de la planta tratadora de aguas residuales del municipio de Atlixco, Puebla*. Estrategias para el Desarrollo Agrícola Regional. Colegio de Postgraduados *Campus Puebla*. Tesis de Maestría. 154 p.
- Olvera, I., Ocampo, I., Tornero, M. A., Silva, S. E., & González, E. (2020). Calidad agronómica del agua residual tratada utilizada en la producción agrícola en Atlixco, Puebla. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 17(4), pp. 603-614. doi: <https://doi.org/10.22231/asyd.v17i4.1394>
- Paluszak, Z., Ligocka, A., Breza-Boruta, B., & Olszewska, H. (2003). The survival of selected fecal bacteria in peat soil amended with slurry. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, 6(2), pp. 1-6. <http://www.ejpau.media.pl/volume6/issue2/animal/art-04.html>
- Pérez, G., Tamariz, V., López, L., Hernández, F., Castelán, R., Morán, J. L., García, W. A., Díaz, A., & Handal, A. (2018). Atoyac River Pollution in the Metropolitan Area of Puebla, México. *Water*, 10(3), pp. 1-17. doi: <https://doi.org/10.3390/w10030267>.
- Pérez, J. P., Peña, E., López, R., & Hernández, I. M. (2016). Metales pesados y calidad agronómica del agua residual tratada. *Idesia (Arica)*, 34(1), pp. 19-25. doi: <https://doi.org/10.4067/S0718-34292016000100003>
- Programa Integral de Apoyo a los Productores de Nopal (PIAPRON). (2022). *Padrón de Beneficiarios del Programa Integral de Apoyo a los Productores de Nopal 2021*. https://www.milpa-alta.cdmx.gob.mx/padrones/Rural/2021/programas_sociales_2021/PIAPRON.PDF
- Plóciniczak, T., Kukla, M., Wątroba, R., & Piotrowska-Seget, Z. (2013). The effect of soil bioaugmentation with strains of *Pseudomonas* on Cd, Zn and Cu uptake by *Sinapis alba* L. *Chemosphere*, 91(9), pp. 1332-1337. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.03.008>
- Prieto, J., González, C. A., Román, A. D., & Prieto, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), pp. 29-44. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93911243003>
- Rachdi, R., Srarfi, F., & Shimi, N. S. (2017). Cactus *Opuntia* as natural flocculant for urban wastewater treatment. *Water Science & Technology*, 76(7), pp. 1875-1883. doi: <https://doi.org/10.2166/wst.2017.370>.
- Robledo-Zacarías, V. H., Velázquez-Machuca, M. A., Montañez-Soto, J. L., Pimentel-Equihua, J. L., Vallejo-Cardona, A. A., López-Calvillo, M. D., & Venegas-González, J. (2017). Hidroquímica y contaminantes emergentes en aguas residuales urbano industriales de Morelia, Michoacán, México. *Revista Internacional De Contaminación Ambiental*, 33(2), pp. 221–235. doi: <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.02.04>
- Rodríguez-Tapia, L., Morales-Novelo, J., & Zavala-Vargas, P. (2012). Evaluación socioeconómica de daños ambientales por contaminación del río Atoyac en México.

Tecnología y Ciencias del Agua, 10(3), pp. 143-151. doi: <https://doi.org/10.3390/w10030267>

- Ruberto, L., Vazquez, S. C., & Cormack, W. P. M. (2003). Effectiveness of the natural bacterial flora, biostimulation and bioaugmentation on the bioremediation of a hydrocarbon contaminated Antarctic soil. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 52(2), pp. 115–125. [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(03\)00048-9](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(03)00048-9)
- Salgado, S., Núñez, R., Palma, D. J., Lagunes, L. C., Debernardi, H., & Mendoza, R. H. (2012). *Manejo de Fertilizantes Químicos y Orgánicos. Biblioteca Básica de Agricultura*. Colegio de Postgraduados.
- Sandoval, A. M., Pulido-Flores, G., Monks, S.; Gordillo, A. J., & Villegas, E. C. (2009). Evaluación fisicoquímica, microbiológica y toxicológica de la degradación ambiental del río Atoyac, México. *Interciencia*, 34(12), pp. 880-887. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442009001200009&lng=es&tlng=es.
- Schirawski, J., & Perlin, M. H. (2017). Plant–Microbe Interaction 2017—The Good, the Bad and the Diverse. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(5), 1374, pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.3390/ijms19051374>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2022). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Silva, S. E., Muñoz, A., de la Isla de Bauer, M. L., & Infante, S. (2002). Contaminación ambiental en la región de Atlixco: 1. Agua. *Terra Latinoamericana*, 20(3), pp. 243-251. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57320303>
- Sjöberg, L. A. (1996). Discussion of the Limitations of the Psychometric and Cultural Theory Approaches to Risk Perception. *Radiation Protection Dosimetry*, 68(3-4), pp. 219-225. doi: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a031868>
- Slovic, P., Fischhoff, B., & Lichtenstein, S. (1980). Facts and Fears: Understanding Perceived Risk. En R. C. Schwing, W. A. Albers (eds.), *Societal Risk Assessment: How Safe Is Safe Enough?* (pp. 181-217). Springer. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0445-4_9
- Sotelo-Pérez, M., & Sotelo-Navalpotro, J. A. (2020). Infraestructuras con riesgo en una comarca de la España Atlántica. *Revista de geografía Norte Grande*, (75), pp. 153-178. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022020000100153>
- Soto G., & Ramírez, A. (2017). The Economic Benefits of The Atoyac Basin’s Restoration in Puebla, Mexico. Espacialidades. *Revista de temas contemporáneos sobre lugares, política y cultura*, 7(1), pp. 66-98. <https://www.redalyc.org/journal/4195/419551034004/html/>
- Tamariz, F. J. V. (1996). *Contaminación de suelos agrícolas por metales pesados en el municipio de Atlixco, Puebla*. Edafología. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de Maestría. 107 p.

- Torres, J. G., & Cornejo, F. M. (2018). Organización y liderazgo en la construcción de un Sistema Agroalimentario Localizado. Un estudio de caso sobre el nopal en Hidalgo, México. *Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 51(28), pp. 1-25. doi: <https://doi.org/10.24836/es.v28i51.496>
- Unión Europea (UE). (2011). *Reglamento (UE) No 420/2011 de La Comisión de 29 de abril de 2011 que modifica el Reglamento (CE) no 1881/2006, por el que se fija el contenido máximo de determinados contaminantes en los productos alimenticios*. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:111:0003:0006:ES:PDF>
- Unión Europea (UE). (2014). *Reglamento (UE) No 488/2014 De La Comisión de 12 de mayo de 2014 que modifica el Reglamento (CE) no 1881/2006 por lo que respecta al contenido máximo de cadmio en los productos alimenticios*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0488&from=ES>
- Unión Europea (UE). (2015a). *Decisión (UE) 2015/2099 de la Comisión de 18 de noviembre de 2015 por la que se establecen los criterios ecológicos para la concesión de la etiqueta ecológica de la UE a sustratos de cultivo, enmiendas del suelo y cubiertas del suelo. [notificada con el número C(2015) 7891]* Unión Europea, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015D2099&from=es>
- Unión Europea (UE). (2015b). *Reglamento (UE) 2015/1005 de La Comisión de 25 de junio de 2015 que modifica el Reglamento (CE) No 1881/2006 por lo que respecta al contenido máximo de plomo en determinados productos alimenticios*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015R1005>
- Unión Europea (UE). (2015c). *Reglamento (UE) 2015/1006 de La Comisión de 25 de junio de 2015 por el que se modifica el Reglamento (CE) no 1881/2006 en cuanto al contenido máximo de arsénico inorgánico en los productos alimenticios*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015H1381&from=ES>
- Unión Europea (UE). (2020). *Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de mayo de 2020 relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R0741&from=es>
- Unión Europea (UE). (2021a). *Reglamento (UE) 2021/1317 De La Comisión de 9 de agosto de 2021 por el que se modifica el Reglamento (CE) No 1881/2006 en lo relativo a los contenidos máximos de plomo en determinados productos alimenticios*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R1317&from=ES>
- Unión Europea (UE). (2021b). *Reglamento (UE) 2021/1323 De La Comisión de 10 de agosto de 2021 que modifica el Reglamento (CE) No 1881/2006 por lo que respecta al contenido máximo de cadmio en determinados productos alimenticios*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R1323&from=ES>
- van der Ent, A., Baker, A. J. M., Reeves, R. D., Pollard, A. J., & Schat H. (2013). Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements: Facts and fictions. *Plant and Soil* 362, pp. 319-334. doi: <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1287-3>

- van Schaik, C. P., Terborgh, J. W., & Wright, S. J. (1993). The phenology of tropical forests: Adaptive significance and consequences for primary consumers. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 24, pp. 353-377. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev.es.24.110193.002033>
- Vargas, L. M. (1994). Sobre el concepto de percepción. *Alteridades*. 4(8), pp. 47-53. <https://alteridades.izt.uam.mx/index.php/Alte/article/view/588/586>
- Ventura-Aguilar, R. I., Bosquez-Molina, E., Bautista-Baños, S., & Rivera-Cabrera, F. (2017). Cactus stem (*Opuntia ficus-indica* Mill): anatomy, physiology and chemical composition with emphasis on its biofunctional properties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(15), pp. 5065–5073. doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.8493>
- Vidal-Álvarez, M. (2018). Tratamiento de aguas residuales en México: problemáticas de salud pública y oportunidad de uso de ecotecnologías sostenibles. *Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable*, 3(1-2), pp. 41-58. <http://rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/32/38>
- World Health Organization (WHO). (2006). *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater*. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/78265>
- Zawierucha, I., & Malina, G. (2011). Chapter 8. Bioremediation of Contaminated Soils: Effects of Bioaugmentation and Biostimulation on Enhancing Biodegradation of Oil Hydrocarbons. En A. Singh, N. Parmar, & R. C. Kuhad (eds.). *Bioaugmentation, Biostimulation and Biocontrol. Soil Biology*. (pp. 187-201). doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-19769-7_8
- Zúñiga-Tarango, R., Orona-Castillo, R., Vázquez-Vázquez, C., Murillo-Amador, B., Salazar-Sosa, E., López-Martínez, J. D., García-Hernández, J. L., & Rueda-Puente, E. (2009). Desarrollo radical, rendimiento y concentración mineral en nopal *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. en diferentes tratamientos de fertilización. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 11, pp. 53–68. <https://www.jpacd.org/jpacd/article/view/113/92>



COLEGIO DE POSTGRADUADOS
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
CAMPUS PUEBLA

ANEXO A. CUESTIONARIO

El presente cuestionario tiene el fin de conocer su opinión sobre la contaminación del agua de riego en San Pablo Ahuatempan. La información será tratada de manera confidencial y utilizada estrictamente con fines académicos.

Fecha:

I. ASPECTOS SOCIODEMOGRÁFICOS

1. Número de folio de la encuesta _____
2. Nombre: _____
3. Edad: años
4. Sexo: 1) Masculino 2) Femenino
5. Escolaridad:
1) Primaria 2) Secundaria 3) Bachillerato 4) Licenciatura 5) Posgrado 6) Otro _____
6. ¿Pertenece a alguna asociación de productores?

7. Número de integrantes en su familia, incluyéndose usted:
8. Número hijos:
9. ¿Tiene algún familiar cercano que sea migrante? 1) Sí 2) No
10. En caso de que su respuesta sea “sí”, ¿qué relación familiar tiene con esa persona?
1) Padre 2) Madre 3) # __ Hermano(a) 4) # __ Primo(a) 5) # __ Tío(a) 6) # __ Abuelo(a) 7) Esposa(o) 8)
__ Hijo(a) 9) No tengo familiar en el extranjero

II. PERCEPCIÓN DE PROBLEMAS EN LA ZONA DE RIEGO

¿Cómo califica los siguientes problemas en la zona de riego?

11. Falta de seguridad pública

1) Nada grave 2) Ligeramente grave 3) Bastante grave 4) Muy grave

Comentario _____

12. Falta de sitios para la atención de la salud

1) Nada grave 2) Ligeramente grave 3) Bastante grave 4) Muy grave

Comentario _____

13. Desempleo

1) Nada grave 2) Ligeramente grave 3) Bastante grave 4) Muy grave

Comentario _____

14. Falta de transporte

1) Nada grave 2) Ligeramente grave 3) Bastante grave 4) Muy grave

Comentario _____

15. Falta de conectividad (internet, telefonía)

1) Nada grave 2) Ligeramente grave 3) Bastante grave 4) Muy grave

Comentario _____

16. Falta de caminos

1) Nada grave 2) Ligeramente grave 3) Bastante grave 4) Muy grave

Comentario _____

17. Erosión del suelo

1) Nada grave 2) Ligeramente grave 3) Bastante grave 4) Muy grave

Comentario _____

18. Baja fertilidad del suelo

1) Nada grave 2) Ligeramente grave 3) Bastante grave 4) Muy grave

Comentario _____

19. Plagas

1) Nada grave 2) Ligeramente grave 3) Bastante grave 4) Muy grave

Comentario _____

20. Contaminación del agua

1) Nada grave 2) Ligeramente grave 3) Bastante grave 4) Muy grave

Comentario _____

21. ¿Cuáles son los principales problemas que enfrenta como productor de nopal verdura?

1) plagas y enfermedades 2) precios bajos del nopal verdura 3) manejo de las huertas 4) situación climática 5) comercialización 6) estacionalidad 7) calidad del nopal 8) otro _____

22. ¿Hay algún problema que usted reconozca y que no fue mencionado? ¿Qué tan grave lo considera? 1) Sí 2) No

Comentario _____

III. PERCEPCIÓN DEL RIESGO

¿Qué opina sobre la contaminación de los canales de riego? Responda las siguientes preguntas.

23. ¿Cuál es el grado de contaminación de los canales de riego cerca de la Central Hidroeléctrica Portezuelo I?

1) Nada contaminado 2) Ligeramente contaminado 3) Bastante contaminado 4) Muy contaminado

Comentario _____

24. ¿Cuál es el grado de contaminación de los canales de riego cerca del Jagüey?

1) Nada contaminado 2) Ligeramente contaminado 3) Bastante contaminado 4) Muy contaminado

Comentario _____

25. ¿Cuál es el grado de contaminación de los canales de riego cerca de su parcela?

1) Nada contaminado 2) Ligeramente contaminado 3) Bastante contaminado 4) Muy contaminado

Comentario _____

26. ¿Cómo se da cuenta de que hay contaminación del agua en los canales de riego?

1) ardor en los ojos 2) dolor y/o resequeidad de garganta 3) olor indeseable 4) es menos transparente o tiene color 5) porque lo escucho en los medios de comunicación 6) porque lo dicen las autoridades 7) porque lo dicen otras personas 8) otro _____

27. ¿Ha notado usted que el agua de riego ha afectado al suelo?

Comentario _____

28. ¿En qué ha notado usted que el agua de riego ha llegado a afectar al suelo?

1) se forma una costra blanca en el suelo 2) se pone negro 3) se pone verde 4) se produce menos cosecha
5) se requiere más fertilizante 6) se requiere mayor dosis de fungicida 7) se requiere mayor dosis de
insecticida 8) se requiere mayor dosis de herbicida 9) se endurece o se compacta 10) tiene mal olor 11) no
he notado afectaciones al suelo 12) otro _____

29. ¿Qué hace usted para disminuir las afectaciones al suelo causadas por el agua de riego?

Comentario _____

30. ¿Ha notado usted que el agua de riego ha afectado al nopal?

1) Nunca 2) A veces 3) Constantemente 4) Siempre

Comentario _____

31. ¿En qué época le afecta más la calidad del agua de riego a la cosecha de nopal?

1) todo el año 2) época de lluvia 3) época de seca 4) en ninguna época he notado afectaciones al nopal

Comentario _____

32. ¿En qué meses le afecta más la calidad del agua de riego a la cosecha de nopal? Puede elegir más de una opción.

1) enero 2) febrero 3) marzo 4) abril 5) mayo 6) junio 7) julio 8) agosto 9) septiembre 10) octubre 11)
noviembre 12) diciembre 13) en ningún mes he notado afectaciones al nopal

33. ¿En qué nota usted que el agua de riego ha afectado al nopal?

1) se marchitan 2) se pudren 3) tienen plaga de hongos con mayor facilidad 4) tienen plaga de insectos
con mayor facilidad 5) nace más maleza (arvenses) a su alrededor 6) no he notado afectaciones al nopal 7)
otro _____

34. ¿Qué hace usted para disminuir las afectaciones al nopal causadas por el agua de riego?

Comentario _____

35. ¿Ha notado mejoras en el crecimiento de los cultivos por el agua de riego?

Comentario _____

36. ¿Ha notado usted que el agua de riego ha afectado a los cultivos? 1) Sí 2) No

Comentario _____

37. ¿En qué ha notado usted que el agua de riego les ha llegado a afectar a los cultivos?

1) se marchitan 2) se pudren 3) tienen plaga de hongos con mayor facilidad 4) tienen plaga de insectos con mayor facilidad 5) nace más maleza (arvenses) a su alrededor 6) no he notado afectaciones a los cultivos 7) otro _____

38. ¿Cuáles cultivos ha notado que se han visto afectados con el agua de riego?

1) Tomate 2) Cilantro 3) Cebolla 4) Perejil 5) Hierbabuena 6) Alfalfa 7) Rábano 8) Huahuzontle 9) Ejote Aguacate 10) Polares 11) Solidago 12) Nora 13) Girasol 14) Margaritón 15) Liciantros 16) Flor 17) Ninguno 18) Es incierto

39. ¿Qué hace usted para disminuir las afectaciones a los cultivos causados por el agua de riego?

Comentario _____

40. ¿Cómo afecta la contaminación del agua la salud de los habitantes de la zona de riego?

1) daños en la salud de la piel 2) problemas respiratorios, en ojos y dolor de cabeza 3) Sistema inmune (baja las defensas del organismo, incrementa la posibilidad de enfermarse, afecta el crecimiento, debilita el cuerpo, causa desgaste) 4) Efectos psicológicos 5) Enfermedades en general 6) Efectos en la vida diaria (impide actividades al aire libre) 7) muerte 8) no sabe 9) no afecta a la salud 10) otro

_____ | | | | | | | | | |

41. Las personas enfrentan el riesgo de enfermarse por la contaminación de los canales de riego:

1) Involuntariamente 2) Precavidamente 3) Voluntariamente 4) Con determinación

Comentario _____

42. El riesgo de enfermedad debido a la contaminación de los canales de riego es:

1) Remoto 2) No muy inmediato 3) Muy inmediato 4) Inmediato

Comentario _____

43. ¿Qué tan precisa es la información de las personas acerca de su exposición a enfermarse por la contaminación de los canales de riego?

1) Inexacta 2) Solo ligeramente precisa 3) Bastante precisa 4) Muy precisa

Comentario _____

44. ¿Qué tan conscientes están los técnicos e investigadores de enfermarse por la contaminación de los canales de riego?

1) Nada consciente 2) Ligeramente consciente 3) Bastante consciente 4) Totalmente consciente

Comentario _____

45. Las personas expuestas a enfermarse por la contaminación de los canales de riego:

1) No pueden evitar la enfermedad 2) Pueden evitar la enfermedad con facilidad razonable 3) Pueden evitar la enfermedad con bastante facilidad 4) Pueden evitar la enfermedad muy fácilmente

46. El riesgo de enfermarse por la contaminación de los canales de riego es:

1) Nada riesgoso 2) Ligeramente riesgoso 3) Bastante riesgoso 4) Muy riesgoso Comentario

47. Este riesgo enfermará a las personas:

1) Uno por uno 2) En números pequeños 3) En números grandes 4) Todos a la vez

48. ¿Cuán probable es que este riesgo cause una enfermedad mortal?

1) Completamente improbable 2) Ligeramente probable 3) Bastante probable 4) Muy probable Comentario _____

49. Las personas ante este riesgo están:

1) Nada asustadas 2) Ligeramente asustadas 3) Bastante asustadas 4) Muy asustadas Comentario

50. Los eventos que llevaron a este riesgo fueron:

1) Imprevisibles 2) Ligeramente previsibles 3) Bastante previsibles 4) Muy previsibles

Comentario _____

51. ¿Cuántas personas están expuestas a este riesgo?

1) Ninguna 2) Algunas 3) Bastantes 4) Una gran cantidad

Comentario _____

52. Este riesgo para las generaciones futuras:

1) No plantea ninguna amenaza 2) Plantea alguna amenaza 3) Plantea una gran amenaza 4) Plantea una muy grande amenaza Comentario _____

53. ¿Qué posibilidad hay de que usted se vea afectado por la contaminación del agua de riego?

1) Poco probable 2) Ligeramente probable 3) Bastante probable 4) Muy probable

Comentario _____

54. ¿Qué posibilidad hay de verse en un futuro afectado por la contaminación del agua de riego?

1) Poco probable 2) Ligeramente probable 3) Bastante probable 4) Muy probable

Comentario _____

55. ¿Cree que la contaminación de los canales de riego podría ser una catástrofe para la población, causando:

1) Ninguna enfermedad o muerte 2) Algunas enfermedades y muertes 3) Bastantes enfermedades y muertes 4) Muchas enfermedades y muertes

Comentario _____

56. Los procesos por los que la contaminación del agua podría causar enfermedades y daños son:

1) Invisibles 2) Ligeramente visibles 3) Bastante visibles 4) Muy visibles

Comentario _____

57. ¿Cómo crees que aumenta este riesgo?

1) No aumenta 2) Aumenta un poco 3) Aumenta bastante 4) Aumenta mucho

Comentario _____

58. ¿Crees que es fácil reducir el riesgo?

1) No es fácil de reducir 2) Es algo fácil de reducir 3) Es bastante fácil de reducir 4) Es muy fácil de reducir

Comentario _____

59. ¿Ha notado usted que el agua de riego ha afectado a los animales?

Comentario _____

60. ¿Ha notado malestares en los animales que entran a las parcelas de riego?

1) parásitos en el sistema digestivo 2) infecciones en la piel 3) infecciones respiratorias 4) enrojecimiento de ojos 5) mayor facilidad de enfermarse 6) no he notado malestares en los animales 7) otro

61. ¿Qué hace usted para disminuir las afectaciones a los animales causados por el agua de riego?
Comentario _____

62. Con respecto al nopal producido bajo riego ¿Considera que es mejor su calidad ante el nopal producido bajo temporal?
Comentario _____

63. Con respecto al nopal producido bajo temporal ¿Considera que es mejor su calidad ante el nopal producido bajo riego?
Comentario _____

64. ¿Cuáles son las razones por las que ha reemplazado cultivos con el cultivo de nopal?
Comentario _____

65. ¿Qué cultivos ha reemplazado con el cultivo de nopal?

1) epazote 2) alfalfa 3) hierba buena 4) huauzontle 5) cilantro 6) cebolla 7) maíz 8) perejil 9) girasol 10) nora 11) margarita 12) terciopelo 13) cempasúchil 14) nube 15) aster 16) gladiola 17) crisantemo 18) sorgo 19) calabacita 20) tomate 21) arabela 22) rábano 23) frijol 24) flor 25) otro _____

IV. EXPERIENCIA AGRÍCOLA

66. ¿Hace cuánto tiempo se dedica a la agricultura?

1) Menos de 10 años 2) Entre 10 y 15 años 3) De 15 a 20 años 4) Más de 20 años

67. ¿Qué ha cultivado en San Pablo Ahuatempan?

1) nopal verdura 2) epazote 3) alfalfa 4) hierba buena 5) huauzontle 6) cilantro 7) cebolla 8) maíz

9) perejil 10) girasol 11) nora 12) margarita 13) terciopelo 14) cempasúchil 15) nube 16) aster

17) gladiola 18) crisantemo 19) sorgo 20) calabacita 21) tomate 22) arabela 23) rábano

24) frijol 25) flor 26) otro _____

68. ¿Con qué frecuencia siembra nopal?

1) Nunca 2) A veces 3) Constantemente 4) Siempre

V. MANEJO AGRONÓMICO Y PROCESO PRODUCTIVO DEL NOPAL
SIEMBRA DE NOPAL

69. ¿Cómo realiza la preparación del terreno antes de establecer el cultivo de nopal? Puede elegir más de una opción.

1) barbecho 2) subsoleado 3) surcado 4) paso del arado 5) paso de la rastra

70. ¿Cuánto mide la distancia entre plantas de nopal que están en el mismo surco? _____

71. ¿Cuánto mide la distancia entre surcos de nopal? _____

72. ¿Cuáles son las razones por las que siembra nopal con esas distancias entre plantas?

Comentario _____

73. ¿Cuántas plantas de nopal siembra por hectárea? _____

74. ¿En qué época hace la siembra de nopal?

1) todo el año 2) época de lluvia 3) época de seca

75. ¿En qué mes(es) siembra el nopal? Puede elegir más de una opción.

Comentario _____

MANTENIMIENTO DEL CULTIVO DE NOPAL

76. ¿Cuáles abonos químicos aplica al nopal, cuánto, cuántas veces y en qué momento lo hace?

77. ¿Cuáles abonos orgánicos aplica al nopal, cuánto, cuántas veces y en qué momento lo hace?

78. ¿Cuáles herbicidas químicos aplica al nopal, cuánto, cuántas veces y en qué momento lo hace?

79. ¿Cuáles herbicidas orgánicos aplica al nopal, cuánto, cuántas veces y en qué momento lo hace?

80. ¿Cuáles fungicidas químicos aplica al nopal, cuánto, cuántas veces y en qué momento lo hace?

81. ¿Cuáles fungicidas orgánicos aplica al nopal, cuánto, cuántas veces y en qué momento lo hace?

82. ¿Cuáles insecticidas químicos aplica al nopal, cuánto, cuántas veces y en qué momento lo hace?

83. ¿Cuáles insecticidas orgánicos aplica al nopal, cuánto, cuántas veces y en qué momento lo hace?

84. ¿Cuáles bactericidas químicos aplica al nopal, cuánto, cuántas veces y en qué momento lo hace?

85. ¿Cuáles bactericidas orgánicos aplica al nopal, cuánto, cuántas veces y en qué momento lo hace?

86. ¿Cuáles adherentes químicos aplica al nopal, cuánto, cuántas veces y en qué momento lo hace?

87. ¿Cuáles adherentes orgánicos aplica al nopal, cuánto, cuántas veces y en qué momento lo hace?

88. ¿Cuáles son las razones por las que sustituye plantas de nopal?

1) están enfermas 2) están viejas 3) tienen merma de producción de fruto

89. ¿Cómo realiza el deshierbe de las parcelas con cultivo de nopal?

90. ¿Cuándo realiza el deshierbe de las parcelas con cultivo de nopal?

91. ¿El deshierbe lo realiza antes, durante o después de la cosecha de nopal?

92. ¿Quiénes y cuántos realizan el deshierbe de las parcelas con cultivo de nopal?

93. ¿Utiliza animales como caballos, bueyes o mulas para mover materiales?

1) Nunca 2) A veces 3) Constantemente 4) Siempre

94. ¿Qué herramientas y máquinas utiliza?

1) pala 2) barreta 3) azadón 4) machete 5) bomba 6) tractor 7) otro _____
|_|_|_|_|_|_|_|_|

95. ¿Renta las herramientas y máquinas que utiliza?

1) pala 2) barreta 3) azadón 4) machete 5) bomba 6) tractor 7) otro _____
|_|_|_|_|_|_|_|_|

96. ¿Cuáles son las variedades de nopal que siembra?

97. ¿Por qué siembra esas variedades de nopal?

COSECHA DEL NOPAL

98. ¿En qué época hace la cosecha de nopal?

1) todo el año 2) época de lluvia 3) época de seca

99. ¿En qué mes(es) obtiene la(s) mayor(es) cosecha(s) de nopal?

VI. ECONOMÍA

100. ¿Realiza alguna otra actividad además de la agricultura?

1) Atender un negocio propio 2) Atender un negocio ajeno 3) Oficio (albañilería, carpintería, herrería) 4)

No |_|_|_|_|

101. ¿Con qué frecuencia renta transporte para mover sus productos y lo que necesita para producir?

1) Nunca 2) A veces 3) Constantemente 4) Siempre |_|

102. ¿Recibe algún subsidio por la actividad que desempeña?

1) Nunca 2) A veces 3) Constantemente 4) Siempre |_|

103. ¿Cómo consigue la penca que siembra (cladodio madre de *Opuntia ficus-indica*)?

1) de siembras propias 2) de siembras de familiares/vecinos 3) las compro |_|_|_|_|

104. ¿Cuántas personas trabajan en el sistema de cultivo y venta?

1) # _____ personas en cultivo 2) # _____ personas en venta

105.¿Cuál es el rango de precio del nopal según mes del año?

106.¿Sus principales clientes son minoristas o mayoristas?

1) Minoristas 2) Mayoristas

107.¿Cuánta superficie siembra de nopal verdura (hectáreas o m²)? _____

108.¿Cuáles son los lugares donde realiza la venta del nopal?

109.¿Cuánto invierte en fertilizantes en el cultivo de nopal? _____

110.¿Cuánto invierte en herbicidas en el cultivo de nopal? _____

111.¿Cuánto invierte en insecticidas en el cultivo de nopal? _____

112.¿Cuánto invierte en fungicidas en el cultivo de nopal? _____

113.¿Cuánto invierte en pagos para el deshierbe en el cultivo de nopal?

VII. IMPORTANCIA SOCIAL

114.¿De qué instancias ha recibido asesoría técnica para el cultivo de nopal?

115.¿Qué instancias han realizado investigación, validación o transferencia de tecnología sobre el nopal en San Pablo Ahuatempan? _____

116.¿Se han organizado entre ustedes para hacer su entorno más seguro?

1) Nunca 2) A veces 3) Constantemente 4) Siempre

117.¿Participa su familia en el sistema de cultivo de nopal o venta?

1) Nunca 2) A veces 3) Constantemente 4) Siempre

118.¿Con qué frecuencia participa la mujer en el sistema de cultivo de nopal o venta?

1) Nunca 2) A veces 3) Constantemente 4) Siempre

119.¿Sus padres sembraban nopal?

1) Nunca 2) A veces 3) Constantemente 4) Siempre

120.¿Sus hijos están interesados en continuar sembrando nopal?

1) Nunca 2) A veces 3) Constantemente 4) Siempre

121.¿Cuál es la importancia social del nopal para usted y en San Pablo Ahuatempan?

122.¿Cuál es la importancia cultural del nopal para usted y en San Pablo Ahuatempan?

123.¿Festejan fiestas patronales?

1) Nunca 2) A veces 3) Constantemente 4) Siempre

124.¿Bendicen las plantas o semillas?

1) Nunca 2) A veces 3) Constantemente 4) Siempre

125.¿Qué tan importante es atender el ciclo lunar, canícula, cabañuelas?

1) Nunca 2) A veces 3) Constantemente 4) Siempre

126.¿Qué esperan ser o tener en 5, 15, 20 años?

Gracias por su atención.

ANEXO B. ANOVA EFECTO TRATAMIENTOS EN NÚMERO DE CLADODIOS

Cuadro B1. Efecto de los tratamientos en número de hijas de nopal verdura.

Tratamiento	NH			
	Parcela 1		Parcela 2	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
1 <i>Serratia</i> K120	3.60 ± 0.37 a	4.00 ± 0.36 a	3.50 ± 0.42 a	3.83 ± 0.68 a
2 <i>Serratia</i> MC119	4.00 ± 0.37 a	3.60 ± 0.36 a	2.90 ± 0.42 a	3.83 ± 0.68 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	3.70 ± 0.37 a	3.40 ± 0.36 a	3.80 ± 0.42 a	3.83 ± 0.68 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	4.00 ± 0.37 a	3.70 ± 0.36 a	3.70 ± 0.42 a	3.67 ± 0.68 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	3.60 ± 0.37 a	3.40 ± 0.36 a	3.60 ± 0.42 a	3.83 ± 0.68 a
6 Control	3.60 ± 0.37 a	3.67 ± 0.36 a	3.49 ± 0.42 a	4.33 ± 1.18 a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Cuadro B2. Efecto de los tratamientos en número de nietas de nopal verdura.

Tratamiento	NN			
	Parcela 1		Parcela 2	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
1 <i>Serratia</i> K120	7.60 ± 1.66 a	1.80 ± 0.80 a	2.00 ± 0.76 a	15.47 ± 2.87 a
2 <i>Serratia</i> MC119	10.90 ± 1.66 a	2.30 ± 0.80 a	0.40 ± 0.76 a	11.97 ± 2.87 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	5.60 ± 1.66 a	2.30 ± 0.80 a	2.70 ± 0.76 a	9.80 ± 2.87 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	7.80 ± 1.66 a	2.50 ± 0.80 a	3.30 ± 0.76 a	11.13 ± 2.87 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	6.10 ± 1.66 a	4.20 ± 0.80 a	3.30 ± 0.76 a	11.13 ± 2.87 a
6 Control	10.18 ± 1.67 a	2.91 ± 0.80 a	2.18 ± 0.77 a	10.88 ± 4.97 a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Cuadro B3. Efecto de los tratamientos en el número de brotes de nopal verdura.

Tratamiento	NB			
	Parcela 1		Parcela 2	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
1 <i>Serratia</i> K120	0.00 ± 0.53 a	0.30 ± 0.34 a	0.00 ± 0.73 a	---
2 <i>Serratia</i> MC119	0.00 ± 0.53 a	1.10 ± 0.34 a	0.00 ± 0.73 a	---
3 <i>Enterobacter</i> K131	0.00 ± 0.53 a	0.00 ± 0.34 a	1.50 ± 0.73 a	0.53 ± 0.36 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	0.00 ± 0.53 a	0.00 ± 0.34 a	0.30 ± 0.73 a	---
5 <i>Enterobacter</i> N9	0.90 ± 0.53 a	0.10 ± 0.34 a	0.00 ± 0.73 a	---
6 Control	0.85 ± 0.53 a	0.01 ± 0.34 a	1.05 ± 0.73 a	---

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Cuadro B4. Efecto de los tratamientos en el número de brotes hijas de nopal verdura.

Tratamiento	NBROH			
	Parcela 1		Parcela 2	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
1 <i>Serratia</i> K120	---	---	0.10 ± 0.07 a	0.10 ± 0.19 a
2 <i>Serratia</i> MC119	---	---	0.00 ± 0.07 a	0.60 ± 0.19 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	---	---	0.00 ± 0.07 a	0.10 ± 0.19 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	---	---	0.10 ± 0.07 a	0.10 ± 0.19 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	---	---	0.00 ± 0.07 a	0.10 ± 0.19 a
6 Control	---	---	0.11 ± 0.07 a	0.10 ± 0.33 a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Cuadro B5. Efecto de los tratamientos en el número de brotes nietas de nopal verdura.

Tratamiento	NBRON			
	Parcela 1		Parcela 2	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
1 <i>Serratia</i> K120	1.20 ± 0.60 a	7.40 ± 1.91 a	9.70 ± 1.51 a	0.00 ± 1.03 a
2 <i>Serratia</i> MC119	1.50 ± 0.60 a	7.30 ± 1.91 a	4.00 ± 1.51 a	1.00 ± 1.03 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	2.00 ± 0.60 a	8.40 ± 1.91 a	5.60 ± 1.51 a	---
4 <i>Escherichia coli</i> N16	1.50 ± 0.60 a	10.10 ± 1.91 a	3.60 ± 1.51 a	0.67 ± 1.03 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	1.30 ± 0.60 a	5.80 ± 1.91 a	3.90 ± 1.51 a	4.00 ± 1.03 a
6 Control	1.45 ± 0.61 a	7.79 ± 1.92 a	3.45 ± 1.51 a	0.88 ± 1.78 a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Cuadro B6. Efecto de los tratamientos en el número de brotes bisnietas de nopal verdura.

Tratamiento	NBROB			
	Parcela 1		Parcela 2	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
1 <i>Serratia</i> K120	0.60 ± 0.55 a	0.60 ± 0.47 a	0.00 ± 0.14 a	---
2 <i>Serratia</i> MC119	0.00 ± 0.55 a	0.60 ± 0.47 a	0.00 ± 0.14 a	---
3 <i>Enterobacter</i> K131	1.30 ± 0.55 a	0.00 ± 0.47 a	0.30 ± 0.14 a	---
4 <i>Escherichia coli</i> N16	0.10 ± 0.55 a	0.00 ± 0.47 a	0.20 ± 0.14 a	---
5 <i>Enterobacter</i> N9	0.10 ± 0.55 a	0.60 ± 0.47 a	0.00 ± 0.14 a	---
6 Control	0.11 ± 0.55 a	0.93 ± 0.47 a	0.01 ± 0.14 a	---

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo.

ANEXO C. ANOVA EFECTO TRATAMIENTOS EN GROSOR DE CLADODIOS

Cuadro C1. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta hija uno de nopal verdura.

Tratamiento	GH1 (mm)			
	Parcela 1		Parcela 2	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
1 <i>Serratia</i> K120	25.83 ± 2.50 a	24.59 ± 2.47 a	30.40 ± 2.23 a	29.99 ± 1.85 a
2 <i>Serratia</i> MC119	24.20 ± 2.50 a	23.62 ± 2.47 a	22.76 ± 2.23 a	30.23 ± 1.85 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	26.91 ± 2.50 a	27.89 ± 2.47 a	29.13 ± 2.23 a	29.43 ± 1.85 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	24.52 ± 2.50 a	25.68 ± 2.47 a	27.40 ± 2.23 a	27.30 ± 1.85 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	29.17 ± 2.50 a	28.03 ± 2.47 a	28.68 ± 2.23 a	29.67 ± 1.85 a
6 Control	25.64 ± 2.51 a	24.35 ± 2.48 a	27.16 ± 2.24 a	30.74 ± 3.21 a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Cuadro C2. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta hija dos de nopal verdura.

Tratamiento	GH2 (mm)			
	Parcela 1		Parcela 2	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
1 <i>Serratia</i> K120	24.63 ± 2.45 a	25.95 ± 2.26 a	29.73 ± 2.17 a	28.26 ± 3.14 a
2 <i>Serratia</i> MC119	23.86 ± 2.45 a	23.46 ± 2.26 a	15.76 ± 2.17 b	23.83 ± 3.14 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	27.11 ± 2.45 a	29.56 ± 2.26 a	29.98 ± 2.17 a	32.37 ± 3.14 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	27.56 ± 2.45 a	27.91 ± 2.26 a	30.74 ± 2.17 a	29.29 ± 3.14 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	25.44 ± 2.45 a	25.57 ± 2.26 a	28.17 ± 2.17 a	27.52 ± 3.14 a
6 Control	27.95 ± 2.46 a	28.47 ± 2.28 a	29.19 ± 2.18 a	32.49 ± 5.44 a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Cuadro C3. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta hija tres de nopal verdura.

Tratamiento	GH3 (mm)			
	Parcela 1		Parcela 2	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
1 <i>Serratia</i> K120	24.55 ± 3.03 a	27.99 ± 3.65 a	26.95 ± 4.04 a	23.22 ± 6.86 a
2 <i>Serratia</i> MC119	23.53 ± 3.03 a	19.99 ± 3.45 a	15.68 ± 4.04 a	17.69 ± 6.86 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	22.93 ± 3.03 a	21.70 ± 3.45 a	26.37 ± 4.04 a	21.57 ± 6.86 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	24.86 ± 3.03 a	31.22 ± 3.45 a	19.70 ± 4.04 a	16.12 ± 6.86 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	26.75 ± 3.03 a	25.02 ± 3.45 a	24.28 ± 4.04 a	17.95 ± 6.86 a
6 Control	27.47 ± 3.04 a	29.00 ± 3.46 a	26.30 ± 4.06 a	28.57 ± 11.89 a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Cuadro C4. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta hija cuatro de nopal verdura.

Tratamiento	GH4 (mm)			
	Parcela 1		Parcela 2	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
1 <i>Serratia</i> K120	7.11 ± 4.52 a	18.37 ± 4.66 a	11.76 ± 4.63 a	8.59 ± 7.52 a
2 <i>Serratia</i> MC119	18.57 ± 4.52 a	14.93 ± 4.66 a	11.76 ± 4.63 a	9.65 ± 7.52 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	12.33 ± 4.52 a	10.93 ± 4.66 a	14.77 ± 4.63 a	9.36 ± 7.52 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	15.35 ± 4.52 a	15.65 ± 4.66 a	20.99 ± 4.63 a	17.06 ± 7.52 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	15.26 ± 4.52 a	14.06 ± 4.66 a	18.85 ± 4.63 a	16.79 ± 7.52 a
6 Control	11.54 ± 4.55 a	14.76 ± 4.68 a	14.08 ± 4.65 a	23.88 ± 13.03 a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Cuadro C5. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta hija cinco de nopal verdura.

Tratamiento	GH5 (mm)			
	Parcela 1		Parcela 2	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
1 <i>Serratia</i> K120	2.98 ± 3.57 a	2.49 ± 3.19 a	9.07 ± 3.82 a	9.72 ± 8.01 a
2 <i>Serratia</i> MC119	8.44 ± 3.57 a	10.33 ± 3.19 a	7.93 ± 3.82 a	11.84 ± 8.01 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	4.48 ± 3.57 a	3.99 ± 3.19 a	8.91 ± 3.82 a	13.74 ± 8.01 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	6.13 ± 3.57 a	2.21 ± 3.19 a	9.23 ± 3.82 a	4.22 ± 8.01 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	2.91 ± 3.57 a	4.27 ± 3.19 a	2.48 ± 3.82 a	6.19 ± 8.01 a
6 Control	4.62 ± 3.59 a	4.29 ± 3.20 a	---	---

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Cuadro C6. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta hija seis de nopal verdura.

Tratamiento	GH6 (mm)			
	Parcela 1		Parcela 2	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
1 <i>Serratia</i> K120	0.27 ± 0.95 a	2.54 ± 1.45 a	0.00 ± 1.15 a	1.96 ± 2.65 a
2 <i>Serratia</i> MC119	0.99 ± 0.95 a	0.00 ± 1.45 a	2.81 ± 1.15 a	6.85 ± 2.65 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	0.00 ± 0.95 a	0.00 ± 1.45 a	0.00 ± 1.15 a	1.96 ± 2.65 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	1.56 ± 0.95 a	0.00 ± 1.45 a	0.00 ± 1.15 a	1.96 ± 2.65 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	1.44 ± 0.95 a	3.73 ± 1.45 a	0.00 ± 1.15 a	1.96 ± 2.65 a
6 Control	0.02 ± 0.96 a	---	---	3.04 ± 4.60 a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Cuadro C7. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta hija siete de nopal verdura.

Tratamiento	GH7 (mm)			
	Parcela 1		Parcela 2	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
1 <i>Serratia</i> K120	3.33 ± 1.31 a	2.23 ± 0.91 a	---	---
2 <i>Serratia</i> MC119	0.00 ± 1.24 a	0.00 ± 0.91 a	---	---
3 <i>Enterobacter</i> K131	0.00 ± 1.24 a	0.00 ± 0.91 a	---	---
4 <i>Escherichia coli</i> N16	0.04 ± 1.31 a	0.00 ± 0.91 a	---	---
5 <i>Enterobacter</i> N9	0.00 ± 1.24 a	0.00 ± 0.91 a	---	---
6 Control	0.01 ± 1.31 a	0.01 ± 0.91 a	---	---

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Cuadro C8. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta nieta uno de nopal verdura.

Tratamiento	GN1 (mm)			
	Parcela 1		Parcela 2	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
1 <i>Serratia</i> K120	7.08 ± 1.33 a	5.31 ± 1.68 a	4.52 ± 1.77 a	5.02 ± 1.17 a
2 <i>Serratia</i> MC119	8.22 ± 1.33 a	8.44 ± 1.68 a	5.21 ± 1.77 a	6.00 ± 1.17 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	7.85 ± 1.33 a	6.08 ± 1.68 a	7.64 ± 1.77 a	8.47 ± 1.17 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	7.21 ± 1.33 a	7.81 ± 1.78 a	8.34 ± 1.77 a	6.61 ± 1.17 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	9.17 ± 1.33 a	6.44 ± 1.68 a	6.63 ± 1.77 a	6.65 ± 1.17 a
6 Control	5.48 ± 1.34 a	7.61 ± 1.69 a	4.51 ± 1.77 a	2.92 ± 2.02 a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Cuadro C9. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta nieta dos de nopal verdura.

Tratamiento	GN2 (mm)			
	Parcela 1		Parcela 2	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
1 <i>Serratia</i> K120	7.44 ± 1.22 a	4.51 ± 1.71 a	2.37 ± 1.12 ab	6.09 ± 1.22 a
2 <i>Serratia</i> MC119	6.66 ± 1.22 a	5.85 ± 1.71 a	0.76 ± 1.12 b	6.54 ± 1.22 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	4.12 ± 1.22 a	2.85 ± 1.71 a	5.69 ± 1.12 a	7.43 ± 1.22 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	5.75 ± 1.22 a	4.14 ± 1.71 a	3.01 ± 1.12 ab	9.09 ± 1.22 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	7.84 ± 1.22 a	7.00 ± 1.71 a	4.82 ± 1.12 ab	7.52 ± 1.22 a
6 Control	4.79 ± 1.23 a	7.86 ± 1.72 a	1.79 ± 1.13 ab	6.60 ± 2.12 a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Cuadro C10. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta nieta tres de nopal verdura.

Tratamiento	GN3 (mm)			
	Parcela 1		Parcela 2	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
1 <i>Serratia</i> K120	7.62 ± 1.31 a	0.93 ± 1.08 a	1.70 ± 0.99 a	6.56 ± 0.88 a
2 <i>Serratia</i> MC119	5.62 ± 1.31 a	2.85 ± 1.08 a	0.00 ± 0.99 a	5.18 ± 0.88 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	4.53 ± 1.31 a	3.11 ± 1.08 a	3.61 ± 0.99 a	5.21 ± 0.88 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	5.52 ± 1.31 a	2.07 ± 1.08 a	2.98 ± 0.99 a	6.46 ± 0.88 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	5.62 ± 1.31 a	2.37 ± 1.08 a	3.49 ± 0.99 a	5.97 ± 0.88 a
6 Control	6.88 ± 1.32 a	6.06 ± 1.09 a	1.83 ± 0.99 a	5.26 ± 1.52 a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Cuadro C11. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta nieta cuatro de nopal verdura.

Tratamiento	GN4 (mm)			
	Parcela 1		Parcela 2	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
1 <i>Serratia</i> K120	5.16 ± 1.20 a	0.65 ± 1.37 a	1.48 ± 0.90 a	5.66 ± 0.87 a
2 <i>Serratia</i> MC119	5.89 ± 1.20 a	2.29 ± 1.37 a	0.00 ± 0.90 a	5.27 ± 0.87 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	4.50 ± 1.20 a	2.87 ± 1.37 a	2.03 ± 0.90 a	5.91 ± 0.87 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	4.22 ± 1.20 a	1.20 ± 1.37 a	3.13 ± 0.90 a	6.82 ± 0.87 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	6.39 ± 1.20 a	2.87 ± 1.37 a	3.11 ± 0.90 a	5.84 ± 0.87 a
6 Control	9.26 ± 1.21 a	3.95 ± 1.38 a	1.31 ± 0.91 a	4.57 ± 1.51 a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Cuadro C12. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta nieta cinco de nopal verdura.

Tratamiento	GN5 (mm)			
	Parcela 1		Parcela 2	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
1 <i>Serratia</i> K120	4.89 ± 1.01 a	0.00 ± 0.73 a	1.53 ± 0.84 a	5.27 ± 1.36 a
2 <i>Serratia</i> MC119	4.96 ± 1.01 a	2.04 ± 0.73 a	0.00 ± 0.84 a	5.28 ± 1.36 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	2.50 ± 1.01 a	0.00 ± 0.73 a	1.39 ± 0.84 a	5.47 ± 1.36 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	5.40 ± 1.01 a	1.30 ± 0.73 a	2.37 ± 0.84 a	4.88 ± 1.36 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	5.93 ± 1.01 a	2.77 ± 0.73 a	1.98 ± 0.84 a	6.29 ± 1.36 a
6 Control	5.14 ± 1.02 a	1.18 ± 0.74 a	1.60 ± 0.84 a	7.51 ± 2.35 a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Cuadro C13. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta nieta seis de nopal verdura.

Tratamiento	GN6 (mm)			
	Parcela 1		Parcela 2	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
1 <i>Serratia</i> K120	3.87 ± 1.02 a	0.00 ± 0.55	1.60 ± 0.88 a	6.84 6 ±.39 a
2 <i>Serratia</i> MC119	4.92 ± 1.02 a	1.37 ± 0.55	0.00 ± 0.88 a	5.56 6 ±.39 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	1.69 ± 1.02 a	0.00 ± 0.55	1.19 ± 0.88 a	5.71 6 ±.39 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	4.09 ± 1.02 a	1.16 ± 0.55	2.18 ± 0.88 a	4.55 6 ±.39 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	5.31 ± 1.02 a	0.93 ± 0.55	1.41 ± 0.88 a	6.21 6 ±.39 a
6 Control	5.83 ± 1.02 a	0.49 ± 0.56	1.29 ± 0.89 a	8.46 2 ±.41 a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Cuadro C14. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta nieta siete de nopal verdura.

Tratamiento	GN7 (mm)			
	Parcela 1		Parcela 2	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
1 <i>Serratia</i> K120	3.14 ± 1.18 a	0.00 ± 0.65 a	1.23 ± 0.71 a	6.46 ± 1.75 a
2 <i>Serratia</i> MC119	4.98 ± 1.25 a	1.51 ± 0.65 a	0.00 ± 0.71 a	5.39 ± 1.75 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	1.55 ± 1.18 a	0.00 ± 0.65 a	0.00 ± 0.71 a	6.58 ± 1.75 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	3.46 ± 1.18 a	0.76 ± 0.65 a	1.61 ± 0.71 a	4.34 ± 1.75 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	5.83 ± 1.18 a	1.03 ± 0.65 a	1.63 ± 0.71 a	7.11 ± 1.75 a
6 Control	5.17 ± 1.19 a	0.85 ± 0.65 a	1.06 ± 0.72 a	7.28 ± 3.03 a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Cuadro C15. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta nieta ocho de nopal verdura.

Tratamiento	GN8 (mm)			
	Parcela 1		Parcela 2	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
1 <i>Serratia</i> K120	3.58 ± 1.08 a	0.00 ± 0.43 a	0.55 ± 0.57 a	4.74 ± 1.40 a
2 <i>Serratia</i> MC119	4.13 ± 1.08 a	0.00 ± 0.43 a	0.00 ± 0.57 a	4.28 ± 1.40 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	1.71 ± 1.08 a	0.00 ± 0.43 a	0.00 ± 0.57 a	5.48 ± 1.40 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	3.04 ± 1.08 a	0.67 ± 0.43 a	1.53 ± 0.57 a	2.59 ± 1.40 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	3.75 ± 1.08 a	0.63 ± 0.43 a	0.82 ± 0.57 a	5.69 ± 1.40 a
6 Control	5.66 ± 1.09 a	0.56 ± 0.43 a	0.02 ± 0.58 a	6.83 ± 2.43 a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Cuadro C16. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta hija nieta nueve de nopal verdura.

Tratamiento	GN9 (mm)			
	Parcela 1		Parcela 2	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
1 <i>Serratia</i> K120	2.06 ± 0.95 ab	0.00 ± 0.32 a	0.00 ± 0.37 a	5.58 ± 1.51 a
2 <i>Serratia</i> MC119	2.20 ± 0.95 ab	0.00 ± 0.32 a	0.00 ± 0.37 a	4.74 ± 1.51 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	2.20 ± 0.95 ab	0.00 ± 0.32 a	0.00 ± 0.37 a	7.48 ± 1.51 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	2.68 ± 0.95 ab	0.00 ± 0.32 a	0.70 ± 0.37 a	2.80 ± 1.51 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	0.00 ± 0.95 b	0.56 ± 0.32 a	0.59 ± 0.37 a	4.22 ± 1.51 a
6 Control	4.12 ± 0.95 a	0.63 ± 0.33 a	0.01 ± 0.37 a	5.79 ± 2.61 a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Cuadro C17. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta nieta 10 de nopal verdura.

Tratamiento	GN10 (mm)			
	Parcela 1		Parcela 2	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
1 <i>Serratia</i> K120	1.43 ± 0.87 a	0.00 ± 0.33 a	---	6.90 ± 1.80 a
2 <i>Serratia</i> MC119	2.58 ± 0.87 a	0.00 ± 0.33 a	---	3.38 ± 1.80 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	1.33 ± 0.87 a	0.00 ± 0.33 a	---	7.44 ± 1.80 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	2.25 ± 0.87 a	0.00 ± 0.33 a	---	3.51 ± 1.80 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	0.00 ± 0.87 a	0.65 ± 0.33 a	---	3.46 ± 1.80 a
6 Control	3.56 ± 0.92 a	0.55 ± 0.33 a	---	7.64 ± 3.12 a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Cuadro C18. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta nieta 11 de nopal verdura.

Tratamiento	GN11 (mm)			
	Parcela 1		Parcela 2	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
1 <i>Serratia</i> K120	0.63 ± 0.82 a	0.00 ± 0.23 a	---	3.23 ± 1.92 a
2 <i>Serratia</i> MC119	1.67 ± 0.82 a	0.00 ± 0.23 a	---	4.15 ± 1.92 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	0.90 ± 0.82 a	0.00 ± 0.23 a	---	4.54 ± 1.92 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	1.77 ± 0.82 a	0.00 ± 0.23 a	---	2.39 ± 1.92 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	0.00 ± 0.82 a	0.00 ± 0.23 a	---	3.00 ± 1.92 a
6 Control	4.37 ± 0.82 a	0.58 ± 0.24 a	---	6.37 ± 3.33 a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Cuadro C19. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta nieta 12 de nopal verdura.

Tratamiento	GN12 (mm)			
	Parcela 1		Parcela 2	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
1 <i>Serratia</i> K120	0.53 ± 0.71 a	0.00 ± 0.16 a	---	4.34 ± 1.96 a
2 <i>Serratia</i> MC119	1.64 ± 0.71 a	0.00 ± 0.16 a	---	4.67 ± 1.96 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	1.21 ± 0.71 a	0.00 ± 0.16 a	---	3.51 ± 1.96 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	0.95 ± 0.71 a	0.00 ± 0.16 a	---	2.58 ± 1.96 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	0.00 ± 0.71 a	0.00 ± 0.16 a	---	3.55 ± 1.96 a
6 Control	2.75 ± 0.71 a	0.40 10 0.16	---	2.95 ± 3.40 a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Cuadro C20. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta nieta 13 de nopal verdura.

Tratamiento	GN13 (mm)			
	Parcela 1		Parcela 2	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
1 <i>Serratia</i> K120	0.55 ± 0.70 a	0.00 ± 0.29 a	---	6.09 ± 1.88 a
2 <i>Serratia</i> MC119	1.68 ± 0.70 a	0.00 ± 0.29 a	---	2.23 ± 1.88 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	1.25 ± 0.70 a	0.00 ± 0.29 a	---	1.83 ± 1.88 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	1.04 ± 0.70 a	0.00 ± 0.29 a	---	2.27 ± 1.88 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	0.00 ± 0.70 a	0.00 ± 0.29 a	---	2.15 ± 1.88 a
6 Control	1.50 ± 0.71 a	0.70 10 0.29	---	0.34 ± 3.27 a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Cuadro C21. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta nieta 14 de nopal verdura.

Tratamiento	GN14			
	Parcela 1		Parcela 2	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
1 <i>Serratia</i> K120	0.55 ± 0.72 a	0.00 ± 0.22 a	---	4.07 ± 1.63 a
2 <i>Serratia</i> MC119	1.73 ± 0.72 a	0.00 ± 0.22 a	---	1.83 ± 1.63 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	1.05 ± 0.72 a	0.00 ± 0.22 a	---	1.36 ± 1.63 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	1.60 ± 0.72 a	0.00 ± 0.22 a	---	1.91 ± 1.63 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	0.00 ± 0.72 a	0.00 ± 0.22 a	---	2.12 ± 1.63 a
6 Control	0.54 ± 0.73 a	0.55 ± 0.22 a	---	0.06 ± 2.82 a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Cuadro C22. Efecto de los tratamientos en el grosor de raqueta hija 15 de nopal verdura.

Tratamiento	GN15			
	Parcela 1		Parcela 2	
	Medición 1	Medición 2	Medición 1	Medición 2
1 <i>Serratia</i> K120	0.53 ± 0.53 a	---	---	2.16 ± 3.16 a
2 <i>Serratia</i> MC119	1.65 ± 0.53 a	---	---	0.07 ± 3.16 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	0.00 ± 0.53 a	---	---	3.79 ± 3.16 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	0.62 ± 0.53 a	---	---	0.44 ± 3.16 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	0.14 ± 0.56 a	---	---	0.53 ± 3.16 a
6 Control	0.51 ± 0.53 a	---	---	---

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo.

ANEXO D. ANOVA EFECTO TRATAMIENTOS EN ELEMENTOS

Cuadro D1. Efecto de los tratamientos en concentración de Na de nopal a cielo abierto inoculado con BPCV.

Tratamiento	Na (ppm)	
	Parcela 1	Parcela 2
1 <i>Serratia</i> K120	715.66 ± 137.91 a	892.16 ± 166.53 a
2 <i>Serratia</i> MC119	679.86 ± 137.91 a	678.04 ± 166.53 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	962.54 ± 137.91 a	973.18 ± 166.53 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	661.14 ± 137.91 a	631.08 ± 166.53 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	657.16 ± 137.91 a	744.98 ± 166.53 a
6 Control	676.14 ± 137.91 a	700.54 ± 166.53 a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo y análisis de laboratorio.

Cuadro D2. Efecto de los tratamientos en concentración de K de nopal a cielo abierto inoculado con BPCV.

Tratamiento	K (ppm)	
	Parcela 1	Parcela 2
1 <i>Serratia</i> K120	67997.22 ± 3483.43 a	73010.02 ± 6196.02 a
2 <i>Serratia</i> MC119	68163.98 ± 3483.43 a	63333.40 ± 6196.02 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	69343.82 ± 3483.43 a	66569.70 ± 6196.02 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	70972.78 ± 3483.43 a	53664.74 ± 6196.02 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	72520.08 ± 3483.43 a	57162.48 ± 6196.02 a
6 Control	79347.46 ± 3483.43 a	61441.76 ± 6196.02 a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo y análisis de laboratorio.

Cuadro D3. Efecto de los tratamientos en concentración de Fe de nopal a cielo abierto inoculado con BPCV.

Tratamiento	Fe (ppm)	
	Parcela 1	Parcela 2
1 <i>Serratia</i> K120	154.30 ± 48.24 a	98.38 ± 13.15 a
2 <i>Serratia</i> MC119	126.44 ± 48.24 a	88.24 ± 13.15 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	87.62 ± 48.24 a	112.72 ± 13.15 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	79.64 ± 48.24 a	105.66 ± 13.15 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	88.68 ± 48.24 a	125.82 ± 13.15 a
6 Control	69.98 ± 48.24 a	144.44 ± 13.15 a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo y análisis de laboratorio.

Cuadro D4. Efecto de los tratamientos en concentración de Cu de nopal a cielo abierto inoculado con BPCV.

Tratamiento	Cu (ppm)	
	Parcela 1	Parcela 2
1 <i>Serratia</i> K120	16.62 ± 0.95 b	25.10 5 ±.02 a
2 <i>Serratia</i> MC119	16.56 ± 0.95 b	23.46 5 ±.02 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	19.50 ± 0.95 ab	25.28 5 ±.02 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	21.12 ± 0.95 a	25.10 5 ±.02 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	20.28 ± 0.95 ab	26.88 5 ±.02 a
6 Control	22.98 ± 0.95 a	27.02 5 ±.02 a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo y análisis de laboratorio.

Cuadro D5. Efecto de los tratamientos en concentración de Mn de nopal a cielo abierto inoculado con BPCV.

Tratamiento	Mn (ppm)	
	Parcela 1	Parcela 2
1 <i>Serratia</i> K120	262.86 ± 44.98 a	340.96 ± 71.05 a
2 <i>Serratia</i> MC119	190.92 ± 44.98 a	240.76 ± 71.05 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	207.20 ± 44.98 a	218.80 ± 71.05 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	172.48 ± 44.98 a	206.69 ± 71.05 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	139.86 ± 44.98 a	258.10 ± 71.05 a
6 Control	182.08 ± 44.98 a	260.44 ± 71.05 a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo y análisis de laboratorio.

Cuadro D6. Efecto de los tratamientos en concentración de Ca de nopal a cielo abierto inoculado con BPCV.

Tratamiento	Ca (ppm)	
	Parcela 1	Parcela 2
1 <i>Serratia</i> K120	41789.76 ± 4104.48 a	38997.64 ± 3797.08 a
2 <i>Serratia</i> MC119	37275.74 ± 4104.48 a	38455.68 ± 3797.08 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	40718.16 ± 4104.48 a	39781.64 ± 3797.08 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	35141.90 ± 4104.48 a	33033.66 ± 3797.08 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	30039.88 ± 4104.48 a	36412.36 ± 3797.08 a
6 Control	40805.82 ± 4104.48 a	35652.10 ± 3797.08 a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo y análisis de laboratorio.

Cuadro D7. Efecto de los tratamientos en concentración de Mg de nopal a cielo abierto inoculado con BPCV.

Tratamiento	Mg (ppm)	
	Parcela 1	Parcela 2
1 <i>Serratia</i> K120	15351.98 ± 1188.26 a	19633.48 ± 879.14 a
2 <i>Serratia</i> MC119	15338.92 ± 1188.26 a	19530.36 ± 879.14 a
3 <i>Enterobacter</i> K131	15843.84 ± 1188.26 a	19444.60 ± 879.14 a
4 <i>Escherichia coli</i> N16	15908.34 ± 1188.26 a	17212.60 ± 879.14 a
5 <i>Enterobacter</i> N9	15910.18 ± 1188.26 a	17414.30 ± 879.14 a
6 Control	17235.54 ± 1188.26 a	17789.14 ± 879.14 a

¹Medias identificadas con la misma letra en el sentido de las columnas significan que no existe diferencia estadísticamente significativa. Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia con información de campo y análisis de laboratorio.