



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

Tolerancia de *Salix babylonica* presente en humedales del
Valle de Toluca expuestos a diferentes condiciones de
impacto ambiental

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES

PRESENTA

Griselda Cruz Ruiz

DIRIGIDA POR

Dra. Patricia Balderas Hernández

Dr. Moisés Tejocote Pérez

Dra. Gabriela Roa Morales



México, 2020

ESTE TRABAJO SE DESARROLLO EN LA FACULTAD DE QUÍMICA DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO, DENTRO DEL PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES, EN EL ÁREA DE CALIDAD AMBIENTAL, EN LA LINEA DE PREVENCIÓN, CONTROL Y EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN; EN LAS INSTALACIONES DEL CENTRO CONJUNTO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA SUSTENTABLE (CCIQS) UAEM-UNAM EN EL LABORATORIO DE QUÍMICA AMBIENTAL Y EN EL LABORATORIO DEL CENTRO DE INVESTIGACION EN CIENCIAS BIOLOGICAS APLICADAS (CICBA).

AGRADEZCO A LAS AUTORIDADES POR LAS FACILIDADES BRINDADAS, ASÍ COMO AL CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA (CONACYT) POR EL APOYO ECONOMICO DE LA BECA NUMERO 507263.

ESTE TRABAJO FUE REGISTRADO CON EL TÍTULO **TOLERANCIA DE *Salix babylonica* PRESENTE EN HUMEDALES DEL VALLE DE TOLUCA EXPUESTOS A DIFERENTES CONDICIONES DE IMPACTO AMBIENTAL.**, ANTE LA SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS AVANZADOS DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO CON EL NÚMERO **DCAAM-0417**

Agradecimientos

A todos los que fueron partícipes de este proyecto. A la Dra. Patricia Hernández Balderas, Dra. Gabriela Roa Morales y el Dr. Moisés Tejocote-Pérez por la dirección de este trabajo, por su motivación y confianza.

Al Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable (CCIQS) UAEM- UNAM y Centro de Investigación en Ciencias Aplicadas (CICBA) por las facilidades brindadas para esta investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado a través de la beca para realizar mis estudios de doctorado.

A mi familia, que es mi soporte y motivación, por su infinito amor y paciencia.

RESUMEN

En México, los indicadores generales muestran que 73% de los cuerpos de agua del país están contaminados. Una de las principales fuentes de contaminación es la descarga de aguas residuales sin tratar en ríos, lagos y océanos, generando la disminución de fuentes de agua potable, el incremento de enfermedades gastrointestinales principalmente en niños y la degradación de sistemas acuáticos. Esta problemática ha llevado a la comunidad científica a desarrollar tecnologías sustentables y de bajo costo, como la fitorremediación para el tratamiento de contaminantes.

La fitorremediación se basa en el uso de plantas para el tratamiento de contaminantes, por lo que una de las principales consideraciones para su aplicación es la elección de la especie vegetal que se va a utilizar. Las especies más recomendables son aquellas tolerantes a la presencia de contaminantes, de rápido crecimiento y de fácil propagación. El sauce llorón (*Salix babylonica*) es un árbol que cuenta con estas características por lo que es considerada una especie apta para prácticas de fitorremediación.

Con la finalidad de elegir los fenotipos más aptos para su uso en prácticas de fitorremediación, en este trabajo se evaluaron las características fenotípicas y fisiológicas de ejemplares de *Salix babylonica* presentes en humedales del Valle de Toluca, así como las condiciones de impacto ambiental de los humedales donde se desarrollan. Como se describe en el capítulo 3, inicialmente se realizó un muestreo dirigido en el Valle de Toluca, para ubicar humedales en los que estuvieran presentes ejemplares de *Salix babylonica*. Se eligieron 6 localidades de estudio: Mexicalcingo, San Lucas Tunco, San Pedro Tultepec, Almoloya de Juárez, Santa Juana 1 y Santa Juana 2, en las cuales, para evaluar el impacto ambiental de los humedales se midieron los parámetros de calidad de agua: pH, conductividad, alcalinidad, amoníaco, fósforo, nitratos y demanda química de oxígeno (DQO). De acuerdo con el parámetro DQO, las localidades se encuentran dentro de la categoría

En cada localidad, se realizó la caracterización fenotípica y metabólica de ejemplares de *Salix babylonica*. La caracterización fenotípica se realizó mediante la medición de la altura, diámetro a la altura del pecho (DAP) y diámetro de la copa (cobertura). También se determinó el sexo de cada individuo mediante la observación de las flores. La caracterización metabólica se realizó mediante la determinación de la concentración de pigmentos fotosintéticos (clorofila a, clorofila b y carotenos) y la determinación de la tasa de asimilación neta (TAN), para ello se obtuvieron muestras de follaje durante los meses de marzo, junio, septiembre y diciembre.

El análisis de parámetros de calidad de agua muestra que de acuerdo con el parámetro DQO las localidades están entre la categoría contaminado a fuertemente contaminado. La evaluación de las características fenotípicas mostró que la totalidad de los individuos son femeninos. Con respecto a las características altura, DAP y cobertura, se encontraron diferencias significativas entre localidades, siendo los árboles de San Lucas Tunco los que mostraron los valores más altos. La tasa de asimilación neta no mostro diferencias entre temporadas de muestreo, pero si se encontraron diferencias significativas entre localidades, siendo la localidad de Santa Juana 2 la que mostro los valores más altos. En cuanto a la concentración de clorofilas, la relación clorofila total-carotenos fue menor a 4.2 en todas las localidades lo cual indica que se encuentran bajo condiciones de estrés.

ABSTRACT

In Mexico, general indicators show that 73% of the country's water bodies are contaminated. One of the main sources of pollution is the discharge of untreated sewage into rivers, lakes and oceans, generating the decrease of sources of drinking water, the increase of gastrointestinal diseases mainly in children and the degradation of aquatic systems. This problem has led the scientific community to develop sustainable and low-cost technologies, such as phytoremediation for the treatment of contaminants.

Phytoremediation is based on the use of plants for the treatment of contaminants, so one of the main considerations for its application is the choice of the plant species to be used. The most recommended species are those tolerant to the presence of pollutants, fast growing and easily propagated. The weeping willow (*Salix babylonica*) is a tree that has these characteristics and is therefore considered a species suitable for phytoremediation practices.

In order to choose the most suitable phenotypes for use in phytoremediation practices, in this work the phenotypic and physiological characteristics of *Salix babylonica* specimens present in wetlands of the Toluca Valley were evaluated, as well as the environmental impact conditions of the wetlands where they develop. As described in Chapter 3, initially conducted sampling was conducted in the Toluca Valley, to locate wetlands where *Salix babylonica* specimens were present. Six study locations were chosen: Mexicalcingo, San Lucas Tunco, San Pedro Tultepec, Almoloya de Juárez, Santa Juana 1 and Santa Juana 2, in which, to evaluate the environmental impact of the wetlands, the water quality parameters were measured: pH, conductivity, alkalinity, ammonia, phosphorus, nitrates and chemical oxygen demand (COD). According to the COD parameter, the locations are within the category

In each locality, phenotypic and metabolic characterization of *Salix babylonica* specimens was performed. Phenotypic characterization was performed by measuring the height, chest height diameter (DAP) and cup diameter (coverage). The sex of everyone was also determined by observing the flowers. Metabolic characterization was performed by determining the concentration of photosynthetic pigments (chlorophyll a, chlorophyll b, carotenoids) and determining the net assimilation rate (NAR), for this foliage samples were obtained during the months of March, June, September and December.

The analysis of water quality parameters shows that according to the COD parameter, the locations are among the contaminated to heavily contaminated category. The evaluation of phenotypic

characteristics showed that all individuals are female. With respect to characteristics height, DAP and coverage, significant differences were found between locations, with the trees of San Lucas Tunco being the ones that showed the highest values. The net assimilation rate did not show differences between sampling seasons, but significant differences were found between locations, with the location of Santa Juana 2 showing the highest values. Regarding the concentration of chlorophylls, the total chlorophyll-carotene ratio was less than 4.2 in all locations, which indicates that they are under stress conditions

Índice

RESUMEN	4
ABSTRACT	6
Capítulo 1. Marco Referencial	11
1.1 Impacto Ambiental	12
1.1.1 Contaminación del agua.....	12
1.1.2 Humedales	13
1.2 Tolerancia	14
1.2.1 Fotosíntesis.....	16
1.2.2 Tasa de asimilación neta (TAN).....	18
1.5 Fitorremediación	18
1.6 Género <i>Salix</i>	21
1.7 <i>Salix babylonica</i>	23
Capítulo 2. Justificación, Hipótesis y Objetivos	26
2.1 Justificación	27
2.2 Hipótesis	28
2.3 Objetivo General	28
2.4 Objetivos Particulares	28
Capítulo 3. Metodología	29
3.1 Ubicación y caracterización de las localidades	30
3.2 Caracterización de las localidades	33
3.2.1 Alcalinidad, Amoniac, Fósforo, Nitratos y pH	33
3.2.2 Color.....	33

3.2.3 Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	33
3.3 Caracterización de <i>Salix babylonica</i>	33
3.3.1 Sexo.....	34
3.3.2 Altura total.....	34
3.3.3 Diámetro del tronco (DAP)	34
3.3.4 Cobertura.....	35
3.4 Caracterización metabólica	35
3.4.1 Concentración de pigmentos fotosintéticos.....	35
3.4.2 Tasa de asimilación neta (TAN).....	35
3.5 Análisis de datos	36
Capítulo 4. Resultados y Discusión general	37
4.1 Capitulo de libro.....	39
4.2 Artículo enviado	57
5. Conclusiones.....	71
Referencias	73
Anexos.....	80

Índice de Tablas

Tabla 1. Plantas utilizadas para fitorremediación y contaminante tratado.....	20
Tabla 2. Especies de <i>Salix</i> utilizadas para fitorremediación y contaminante tratado.....	21
Tabla 3. Taxonomía y nomenclatura de <i>Salix babylonica</i>	23
Tabla 4 Sitios de muestreo y su ubicación geográfica.	32

Índice de Figuras

Figura 1. Componentes del medio ambiente.....	12
Figura 2. Representación del desempeño de una especie con relación a las condiciones ambientales	15
Figura 3. Respuestas de las plantas a efectos negativos de los factores de estrés	16
Figura 4. Ejemplar de <i>Salix babylonica</i>	24
Figura 5. Esquema de la metodología	30
Figura 6.. Municipios del valle de Toluca donde se realizó el muestreo	32

Capítulo 1. Marco Referencial

1.1 Impacto Ambiental

El ambiente es el conjunto de factores físico-naturales y socioculturales que interactúan entre sí. Está compuesto por el medio físico natural y el medio socioeconómico (Figura 1) (Dellavedova, 2011)

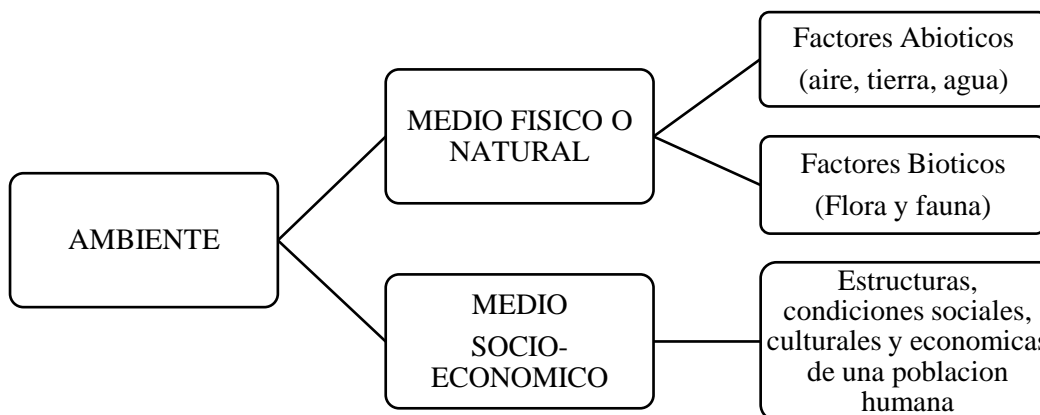


Figura 1. Componentes del medio ambiente

El impacto ambiental se define como el efecto producido en el ambiente y los procesos naturales como resultado del aprovechamiento de los recursos naturales, contaminación y cambio de uso de suelo. (Conesa, 2010; Perevochtchikova 2013; SEDUE, 1988). El efecto que tiene depende principalmente de la magnitud (calidad y cantidad del factor ambiental afectado), importancia (se refiere a la intensidad, extensión, momento y reversibilidad del impacto) y tipo de impacto (positivo o negativo) (Sanz 1991).

1.1.1 Contaminación del agua

Para evaluar el impacto ambiental, se utilizan indicadores que proporcionan una medida de la magnitud del impacto, ya sea de manera cualitativa mediante conceptos de valoración (bueno, regular, deficiente, nulo) o cuantitativa (numéricamente). Estos indicadores nos permiten medir el impacto de una acción sobre el factor ambiental (Estevan 1981).

Uno de los factores ambientales más impactados por la contaminación es el agua. La evaluación del nivel de impacto se lleva a cabo utilizando indicadores como: la demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO_5), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST), (CONAGUA, 2015). La DBO_5 determina la cantidad de materia orgánica biodegradable y la

DQO mide la cantidad total de materia orgánica proveniente principalmente de las descargas de aguas. El incremento en la concentración de estos parámetros en los cuerpos de agua incide en la disminución del contenido de oxígeno disuelto e incrementa la turbidez del agua con la consecuente afectación de los sistemas acuáticos.

Estos parámetros permiten reconocer gradientes que van desde una condición relativamente natural o sin influencia de la actividad humana hasta agua que muestra indicios o aportaciones importantes de descargas de aguas residuales. En 2009 el porcentaje de cuencas clasificadas como fuertemente contaminadas de acuerdo con estos tres indicadores (DBQ₅, DQO Y SST) fue de 54.2% para la Región Hidrológica Administrativa Aguas del Valle de México, 13.7% para la Región Hidrológica Península de Baja California, 13.1 % para la Región Hidrológica Administrativa Balsas y 10 % para la Región Hidrológica Administrativa Lerma-Santiago-Pacífico.

Coincidentemente son estas Regiones Hidrológicas Administrativas las que experimentan un grado de presión fuerte sobre los recursos hídricos ya que cuentan con una alta densidad poblacional. Además, en estas regiones se encuentran establecidos importantes corredores industriales que contribuyen con importantes descargas de aguas residuales en ríos.

1.1.2 Humedales

También ecosistemas como los humedales han sido fuertemente impactados por la contaminación. Se calcula que, a nivel mundial, más del 50% de los humedales han sido destruidos desde 1900, muchos de ellos en los países del norte durante los primeros 50 años del siglo XX. De 1950 a la fecha la destrucción es mayor en los humedales tropicales y subtropicales. Para México, Landgrave y Moreno-Casasola (2012) calculan una pérdida o deterioro del 62% de los humedales. La degradación es un punto crítico, no sola la pérdida.

De acuerdo a la Ley General de Aguas (2015), los humedales son zonas de transición entre los sistemas acuáticos y terrestres que constituyen áreas de inundación temporal o permanente, sujetas o no a la influencia de mareas, como pantanos, ciénegas y marismas, cuyos límites los constituyen el tipo de vegetación hidrófila de presencia permanente o estacional; las áreas donde el suelo es predominantemente hídrico; y las áreas lacustres o de suelos permanentemente húmedos por la descarga natural de acuíferos.

Son de importancia ecológica, ambiental y social por los servicios ambientales que prestan como: almacenamiento del agua; conservación de los mantos acuíferos, purificación del agua mediante la retención de nutrientes, sedimentos y contaminantes; protección contra tormentas y mitigación de inundaciones; estabilización de litorales y control de la erosión. Así como la preservación de la vida silvestre ya que proveen un hábitat para diversos organismos. (Mitsch y Gosselink, 2000). Desde el punto de vista económico algunos de sus beneficios son el permitir el desarrollo de especies marinas que sustentan las pesquerías, la protección contra tormentas y huracanes, estabilización de la línea de costa, además del valor paisajístico de estos lugares que son un importante atractivo para el desarrollo turístico. Es por ello importante el conservar y manejar adecuadamente estos **ecosistemas**.

1.2 Tolerancia

Las plantas pueden adaptarse a diferentes condiciones de estrés, lo cual depende del grado de tolerancia de la especie. La tolerancia es definida como la capacidad de un organismo de mantener la aptitud física bajo condiciones de estrés como sequías, bajas o altas temperaturas, presencia de contaminantes, salinidad y deficiencia o exceso de nutrientes (Baucom y De Roode, 2011; Núñez-Farfán et al., 2007; Stowe et al., 2000). Desde un punto de vista ecológico las plantas tolerantes pueden sobrevivir y reproducirse bajo estas condiciones a diferencia de las plantas no tolerantes (Simms, 2000) mientras que, desde un punto de vista agronómico, una especie tolerante es aquella que bajo condiciones de estrés es capaz de producir un cultivo de alta calidad y rendimiento (Qiu et al., 2011). A diferencia de otros tipos de resistencia como la antibiosis y la antixenosis, la tolerancia es un tipo de resistencia en la cual la planta desarrolla mecanismos para compensar los daños ocasionados por algún factor de estrés (Peterson et al., 2017).

Los organismos crecen y se desarrollan dentro de límites de tolerancia específicos. De acuerdo con Sherlforf (1913), por debajo o por encima de esos límites de tolerancia, la sobrevivencia, crecimiento y reproducción es reducida (Ramírez-R et al., 2012). Estos límites están determinados tanto por factores abióticos (condiciones climáticas, presencia de contaminantes, disponibilidad de nutrientes) como por factores bióticos (presencia de patógenos) que determinan la presencia, ausencia y abundancia de un organismo (Figura 2).

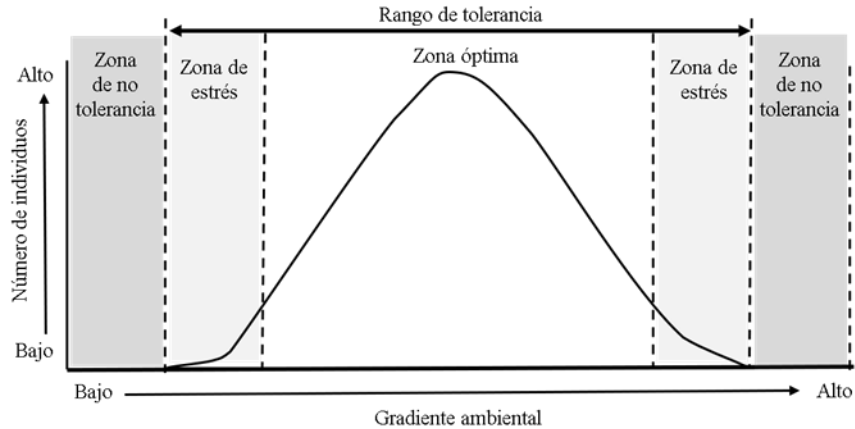


Figura 2. Representación del desempeño de una especie con relación a las condiciones ambientales

Los organismos pueden presentar un amplio o estrecho rango de tolerancia a diversos factores ambientales. Los organismos eurioicos, sobreviven dentro de límites amplios en relación con un factor ambiental, mientras que los organismos estenoicos están limitados a rangos estrechos. Cuando un organismo puede sobrevivir dentro de un amplio rango, por ejemplo, temperatura, se le denomina euritermal, en el caso contrario nos referimos a él como estenotermal (Osborne, 2000).

El rango de tolerancia a factores ambientales determina algunas características de los organismos. Las especies estenoicas tienen una menor variabilidad genética por lo que son particularmente vulnerables a condiciones climáticas cambiantes debido a la falta de plasticidad que les impide responder a nuevas presiones de selección. Por el contrario, las especies eurioicas tienen mayor variabilidad genética que les permite estar protegidas contra la extinción debido a que han desarrollado tolerancia a un amplio rango factores ambientales (Sheth y Angert, 2014). De acuerdo con Grime (1979), las especies con una alta productividad muestran una baja tolerancia al estrés, en contraparte las especies capaces de tolerantes tienen bajas tasas de productividad. En general, la tolerancia implica un coste energético que supone un menor crecimiento, pero a cambio tiene una mayor probabilidad de supervivencia.

Las plantas desarrollan mecanismos de compensación como respuesta a factores de estrés. Entre los mecanismos que se han asociado con las respuestas de tolerancia se encuentran cambios en el crecimiento, cambios fisiológicos y cambios moleculares, así como cambios en los patrones fenológicos (Figura 3) (Garrido et al., 2017; Rao, 2006).

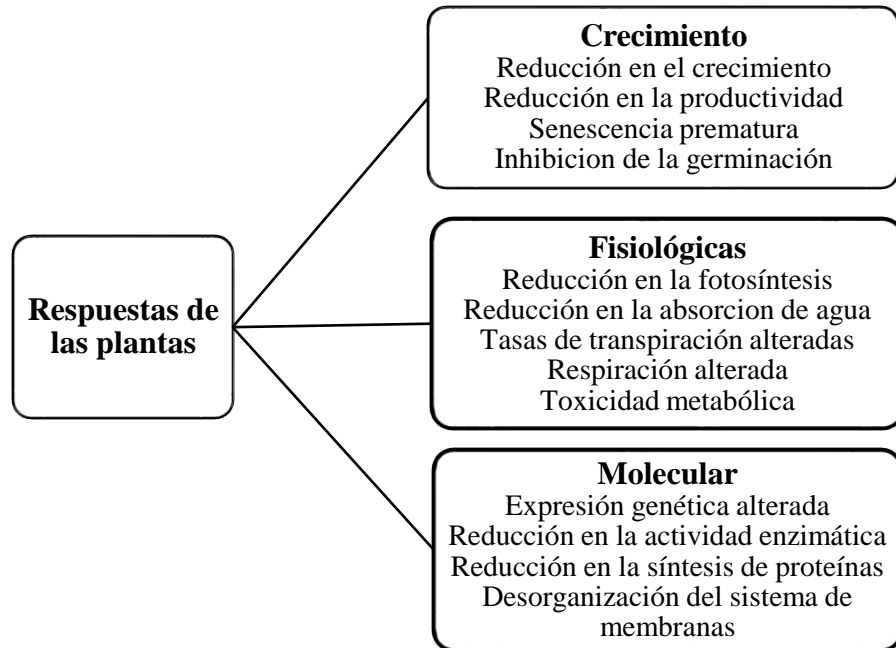
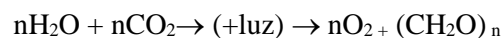


Figura 3. Respuestas de las plantas a efectos negativos de los factores de estrés. Elaboración propia, basado en Rao (2006)

1.2.1 Fotosíntesis

Las plantas están expuestas a factores de estrés ya sean bióticos o abióticos que afectan la fotosíntesis. Desde el punto de vista ecofisiológico, el estudio de la fotosíntesis es importante ya que aporta información sobre la productividad y el efecto de factores de estrés. Durante la fotosíntesis la energía de la radiación solar es convertida en energía química mediante dos reacciones diferenciadas. En la primera reacción la energía luminosa es convertida en energía electroquímica, mientras que en la segunda se produce n foto asimilados como la glucosa, fructuosa, sacarosa o almidón. La ecuación global de la fotosíntesis es:



Durante la fotosíntesis la energía luminosa es absorbida por pigmentos fotosintéticos. Los dos tipos principales pigmentos son las clorofilas y los carotenos. Estas moléculas se encuentran dentro de proteínas formando complejos pigmento-proteína.

El principal pigmento fotosintético es la clorofila que es capaz de absorber la radiación luminosa en la zona del azul y en la zona del rojo del espectro electro visible. Hay dos tipos de clorofila: la clorofila a y la clorofila b. Durante este proceso la luz solar absorbida es transformada en biomasa. Los principales pigmentos encargados de la captación de luz son las clorofilas y los carotenoides que absorben diferentes longitudes del espectro de luz. La clorofila a es el pigmento principal y absorbe longitudes de onda máximas de 670 nm. La clorofila b absorbe longitudes máximas de 650 nm y es considerada un pigmento accesorio (Lichtenthaler, 1987). Los carotenoides también se consideran pigmentos accesorios y su función es la protección del aparato fotosensible (Azcón-Bieto and Talón, 2008; Hopkins and Hüner, 2009; Taiz and Zeiger, 2002)

La concentración de pigmentos fotosintéticos da el color verde a las hojas de las plantas superiores y es un parámetro utilizado para evaluar el estado fisiológico de las plantas. Su concentración puede variar debido a diversos factores. La intensidad de radiación lumínica y la temperatura afectan la concentración de pigmentos; en los meses de alta temperatura o a mayor intensidad disminuye su concentración debido a sus efectos en los centros de reacción (Abbas et al., 2017; Díez et al., 2017). La calidad y cantidad de nutrientes presentes en el ambiente también afecta la concentración de clorofila, siendo mayor su concentración en ambientes ricos en nutrientes (Hepriyadi et al., 2019). También existe una variación entre especies en relación con la forma de crecimiento. Por ejemplo, dentro de un bosque, los arbustos presentan una mayor concentración de clorofila en comparación con árboles y herbáceas (Li et al., 2018).

Condiciones de estrés como enfermedades, contaminantes o salinidad también afectan la concentración de pigmentos en las plantas. Algunas enfermedades afectan el tejido donde se encuentran los cloroplastos afectando la concentración de pigmentos, siendo menor en plantas enfermas en comparación con plantas sanas (Jabeen et al., 2017). La presencia de contaminantes como el cadmio altera la estructura de los cloroplastos y la biosíntesis de clorofilas y carotenos

1.2.2 Tasa de asimilación neta (TAN)

El análisis del crecimiento de una planta nos permite evaluar el efecto de diferentes condiciones ambientales sobre él. El crecimiento es un proceso cuantitativo relacionado con un incremento en el tamaño y peso seco que se puede cuantificar como incremento en longitud y diámetro del cuerpo vegetal. Su análisis se basa en la medición de variables como peso seco, tiempo y área foliar. A su vez estas variables permiten el cálculo de índices de crecimiento como crecimiento del cultivo (TCC), relación de área foliar (RAF), área foliar específica (AFE), índice de área foliar (IAF) y tasa de asimilación neta (TAN) (Barrera et al., 2010).

El cálculo de la tasa de asimilación neta (TAN) se define como la tasa de incremento en peso seco de la planta por unidad de área foliar y por intervalo de tiempo y se expresa en kg (planta) m⁻² (hoja) día⁻¹ (Villar et al., 2004). Es una forma indirecta de medir la eficiencia fotosintética de una planta, ya que mide la ganancia neta de asimilados (Benedetto and Tognetti, 2016). Los valores de TAN de una planta se ven afectados por la fenología de esta. En las primeras etapas fenológicas los valores suelen ser más altos ya que las hojas se encuentran al inicio de su desarrollo. Por el contrario en las últimas etapas fenológicas son menores ya que las hojas se encuentran en senescencia (Santos et al., 2010). Otros factores como nutrientes, hormonas (citocinas y auxinas), temperatura e irradiancia están correlacionados positivamente con los valores de la TAN.

1.5 Fitorremediación

La fitorremediación es el uso de plantas tolerantes a condiciones de estrés para extraer, estabilizar, eliminar, transformar e inmovilizar contaminantes (Dhir, 2013; Rahman et al., 2015). Es una tecnología sustentable y de bajo costo para el tratamiento de ambientes contaminados (Ramamamy, 2016; Zheng et al., 2016). Las plantas y los microorganismos asociados a su rizosfera ofrecen un mayor potencial para la remediación de contaminantes.

Las plantas absorben contaminantes a través de sus raíces y los transportan a diversos tejidos vegetales donde son metabolizados, secuestrados o volatilizados. La raíz afecta las propiedades hidráulicas de los suelos, favoreciendo la filtración y aireación, influyendo así en la velocidad de sedimentación y distribución de contaminantes. También provee las condiciones adecuadas para el crecimiento de microorganismos involucrados en la biodegradación mediante la liberación de exudados que incrementan la degradación microbiana (fitoestimulación) (Truu et al., 2015). Los elementos fitotóxicos extraídos son transformados en biomasa que posteriormente es cosechada para

finos no alimentarios como la producción de madera, fabricación de cartón o incineradas para la producción de energía. La fitorremediación ha demostrado ser una tecnología efectiva en el tratamiento de diversos contaminantes mediante diferentes mecanismos como la fitoextracción, fitovolatización, fitodegradación, rizodegradación, fitoestabilización y rizofiltración (Ali et al., 2013; Pathak, 2016) que se describen a continuación:

Fitoextracción: Mediante este mecanismo la planta absorbe contaminantes del medio y los transloca a las partes aéreas de la planta (ramas, hojas), que posteriormente son cosechadas. También se le conoce como fitoacumulación o fitoabsorción

Fitovolatización: Las plantas extraen contaminantes volátiles, como Se y Hg, presentes en el medio, los cuales son transformados en su forma volátil y liberados en la atmósfera mediante la transpiración.

Fitodegradación: Algunos contaminantes orgánicos como los herbicidas son directamente degradados a través de actividades metabólicas de la planta mediante enzimas como la dehalogenasa y oxigenasa. (Tangahu et al., 2011). Para que ocurra la fitodegradación los compuestos deben ser absorbidos por la planta. La absorción depende de la hidrofobicidad, solubilidad y polaridad del compuesto. Este mecanismo está limitado a contaminantes orgánicos como disolventes clorados, herbicidas, insecticidas, fenoles y nutrientes

Rizodegradación: Se refiere a la descomposición de contaminantes en el suelo por microorganismos en la rizosfera. Las plantas estimulan el crecimiento de microorganismos mediante exudados que contienen carbohidratos, aminoácidos, flavonoides, así como enzimas capaces de degradar contaminantes orgánicos en los suelos. Además, las raíces de las plantas crean condiciones más favorables para los microorganismos al incrementar la aireación y moderar la humedad del suelo. Se utiliza en contaminantes como hidrocarburos de petróleo (Cheng et al., 2019), hidrocarburos aromáticos policíclicos (Dominguez et al., 2019), pesticidas (Sánchez et al., 2017), BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos) (Shores et al., 2018) y bifenilos policlorados (Pino et al., 2019).

Fitoestabilización o fitoinmovilización: Mediante este mecanismo se reduce la movilidad y biodisponibilidad de los contaminantes evitando su migración a mantos acuíferos o su entrada a la cadena alimenticia. Las plantas inmovilizan los contaminantes a través de la sorción por raíces, precipitación y complejación en la rizosfera. En el caso de metales contaminantes, las plantas excretan enzimas redox convirtiéndolos a un estado menos tóxico.

El proceso de fitorremediación puede ser afectado por variables como el tipo de contaminante o el tipo de planta utilizada. Las especies más recomendables son aquellas de alta producción de biomasa, alta tolerancia a elementos contaminante, rápido crecimiento y alta tasas de transpiración. De la velocidad de crecimiento depende la velocidad en la captación de contaminantes y una alta tasa de transpiración (de esto depende la reducción del volumen de residuo). Otras características que se deben considerar para la elección de la planta a utilizar para fitorremediación son: capacidad de remoción de sedimentos, tolerancia a los niveles de contaminantes, sencillez de manipulación, facilidad de propagación, disponibilidad a lo largo del año, estética (color, talla y tamaño) y facilidad de mantenimiento, transporte y compra. Algunas las especies utilizadas para fitorremediación encontramos algas, macrófitas acuáticas y árboles de la familia Salicaceae de los géneros *Salix* sp (sauce) y *Populus* sp (álamos)(Tabla1). (Kurade et al., 2019; Romero-Aguilar et al., 2009; Victor et al., 2016).

Tabla 1. Plantas utilizadas para fitorremediación y contaminante tratado

Planta	Nombre común	Contaminante tratado	Eficiencia de remoción (%)	Referencia
<i>Azolla pinata</i>	helecho mosquito	Cd, Mn	100	(Akinbile et al., 2019)
<i>Lemna</i> sp.	lenteja de agua	As	82	(de Souza et al., 2019)
<i>Typha latifolia</i>	junco	Carbamazepina	48.3	(Tejeda et al., 2017)
<i>Phragmites australis</i>	carrizo	Pb, Cd, Ni	95, 93, 84	(Bello et al., 2018)
<i>Zantedeschia aethiopica</i>	alcatraz	Carbamazepina	48.3	(Tejeda 2017)
<i>Pistia</i> sp	lechuga de agua	Cu	92.45	(Novita et al 2019)
<i>Eichhornia crassipes</i>	lirio acuático	Nitrógeno amoniacal	67	(Ting et al., 2018)
<i>Scirpus validus</i>	tule	Demanda química de Oxígeno (DQO), nitrógeno amoniacal	11.20 8.70	(Aweng et al., 2018)
<i>Salix matsudana</i>	tortuosa	Cd	Tolerante	(Yang et al., 2018)
<i>Populus alba</i>	álamo blanco	Dioctil ftalato	Tolerante	(Vannucchi et al., 2019)

Las macrófitas flotantes comprenden un amplio y variado grupo de plantas que se consideran hiperacumuladoras entre las que desatan el jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), la lechuga de agua (*Pistia stratiotes*), salvinia (*Salvinia spp*), redondita de agua (*Hydrocotyle ranunculoides*), y algunas especies de lentejas de agua (*Lemna spp*, *Spirodella spp*) (Nirmal Kumar et al., 2008). La mayoría ha demostrado eficiencias de remoción significativamente altas en todos los constituyentes de las aguas residuales (Queiroz et al., 2019). También presentan altas remociones de metales pesados

(Rezania et al., 2016), *Azolla pinnata*, por ejemplo, remueve el 100% de cadmio y manganeso presente en aguas residuales (Akinbile et al., 2019; Rezania et al., 2016)

Eichhornia crassipes es uno de los géneros más empleado gracias a su tolerancia a diferentes condiciones climáticas y su rápido crecimiento. Aunque el mal manejo lo ha convertido en un problema ambiental (Coetzee et al., 2017). Su rápida y descontrolada expansión en cuerpos de agua se relaciona con el incremento en la contaminación mineral (especialmente nitratos), y el aumento en la salinidad convirtiéndolo en una fuente de contaminación ya que favorece la eutroficación (Wang et al., 2017; Mengistu et al., 2017).

1.6 Género *Salix*

Los árboles del género *Salix* poseen características como tolerancia a climas diversos, un largo período de crecimiento, alta productividad de biomasa, un sistema radicular profundo y alta densidad de raíces (Barbosa et al., 2016; Brereton et al., 2016; McBride et al., 2016). Dichas características les permiten crecer y desarrollarse en suelos inundados, bajos en nutrientes o contaminados (Hauk et al. 2014; Purdy and Smart 2008; Thomas and Cerrillo 2014; Zhivotovsky et al. 2011). Por ello, algunas especies del género *Salix* se han utilizado en prácticas de fitorremediación de suelos degradados o contaminados, así como en el tratamiento de aguas residuales (Jama-Rodzeńska et al., 2016; Janssen et al., 2015; Kuzovkina and Volk, 2009; Marmiroli et al., 2011; Mleczek et al., 2010).

El uso de árboles del género *Salix* en las prácticas de fitorremediación ha demostrado ser eficaz en la eliminación de una amplia variedad de contaminantes como compuestos orgánicos, sólidos en suspensión, patógenos, metales y nutrientes Tabla 2 (Corseuil and Moreno, 2001; Ramasamy, 2016; Shi et al., 2016; Truu et al., 2015; Wang et al., 2017) . En condiciones de hidroponía en laboratorio, el uso de *Salix* ha mostrado altos porcentajes de eliminación, 87.78% de nitrógeno, 65.58% para el fósforo y 59.90% para la demanda química de oxígeno (Sun et al., 2016)

Tabla 2. Especies de *Salix* utilizadas para fitorremediación y contaminante tratado

Especie usada	Contaminante	Eficiencia de remoción (%)	Referencia
<i>Salix</i> sp	Pentatrene (PHE)	54.7	(Sun et al. 2016)
<i>Salix matsudana</i>	2,4-diclorofenol	73.7	(Shi et al. 2012)

<i>Salix jiangsuensis</i> J172	Fósforo total,	65.58	(Shi et al. 2016)
	nitrógeno total,	87.78	
	Amonio	90.63	
	Nitrato	84.90	
	DQO	58.24-59.9	
<i>Salix nigra</i>	Dioxano	5.6	(Silva 2010)
<i>Salix matsudana</i> x <i>S.</i> <i>alba</i> L.	Cromo Cr (III)	46.22	(Yu and Gu 2007a)
	Cromo Cr (VI)	83	
	ferrocianida	8.64	

La eficiencia de remoción está relacionada con factores como la especie de *Salix*. Por ejemplo, Vassilev (2007) encontró que *S. alba* es más tolerante al exceso de Zn que *S. viminalis* (Vassilev et al. 2007). También hay variaciones en partes específicas de la planta (raíz, tallo u hojas) donde se acumula el contaminante (Terebova et al. 2017). Elementos como Pb, Cd se acumulan principalmente en las raíces (Nikolić et al. 2015; Zhivotovsky et al. 2011), mientras que *Salix babylonica*, se acumula principalmente en las raíces. Los contaminantes también se pueden trasladar en pequeñas concentraciones a las partes aéreas (Sylvain et al. 2016). Sin embargo, para las prácticas de fitorremediación, se recomienda utilizar plantas que acumulen metales en las raíces, ya que de esta forma los contaminantes se inmovilizan evitando su movilización al medio ambiente circundante. Otro factor que determina la eficiencia de *Salix* es la concentración del contaminante. Fischerová y col. (2006) y Kubatová et al. (2016) observaron que la eficiencia de eliminación disminuye con el aumento del contaminante en el medio ambiente. Además, dado que *Salix* es una especie ribereña, las inundaciones afectan la eliminación de contaminantes ya que causan la disminución de la biodisponibilidad de metales pesados debido a la presencia de sulfuros y materia orgánica (Cao et al. 2017).

También se ha observado que los clones seleccionados de sitios contaminados muestran una mayor eficiencia en la eliminación de metales que los clones comerciales. Por ejemplo, los clones de *S. alba* que provienen de poblaciones naturales se desempeñan mejor en presencia de Zn en comparación con los clones comerciales (Bernardini et al. 2016).

introducción

1.7 *Salix babylonica*

Es un árbol caducifolio de copa redondeada y porte colgante, con una altura de entre 8 y 18 m y un ancho de copa de entre 6 y 10 m. Sus ramas son largas y delgadas, y cuelgan hasta el suelo. Su corteza es surcada, de color marrón oscuro, con las ramillas de color verde oliva. Sus hojas son simples, lanceoladas, miden entre 8 y 16 cm de largo, y son de color verde claro en el anverso y verde blanquecino en el reverso. Es una especie dioica. La floración se produce entre los meses de marzo y abril, con flores menudas agrupadas en amentos: los masculinos, de 1,5 a 2 cm de largo y de color amarillento; los femeninos, de 2 a 3 cm y de color verdoso. Sus frutos son cápsulas de 3 a 4 mm de diámetro y de color marrón verdoso que maduran entre mayo y junio y al abrirse sueltan las semillas, cubiertas de pelos sedosos de color blanco amarillento gracias a los cuales se las lleva el viento (Orwa et al., 2009)

Tabla 3. Taxonomía y nomenclatura de *Salix babylonica*

Jerarquía taxonomica	
Reino:	<i>Plantae</i>
División:	<i>Magnoliophyta</i>
Clase:	<i>Magnoliopsida</i>
Orden:	<i>Malpighiales</i>
Familia:	<i>Salicaceae</i>
Género:	<i>Salix</i>
Especie:	<i>Salix babylonica</i> L.
Nombre Común	Sauce llorón



Figura 4. Ejemplar de *Salix babylonica*

Una de las especies de sauce ampliamente distribuidas en México es *Salix babylonica*. Esta especie tiene un importante valor desde el punto de vista ecológico ya que evita la erosión del suelo en riberas de ríos, con lo que protege la flora de la zona y fortalece los cauces ante posibles desbordamientos (Lazos-Ruiz et al., 2016). Por ello fue introducido en Xochimilco durante la década de los treinta para remediar la salificación de los suelos causada por la desecación de los canales (Flores Olvera and Lindig Cisneros, 2005).

Las hojas del extracto de *Salix babylonica* se usan como aditivo para alimentar cabras, corderos, vacas, caballos y conejos (Salem et al.2016). La adición del extracto en los alimentos modula la actividad de fermentación ruminal, mejora la digestibilidad y la utilización de nutrientes (Elghandour et al. 2017; Valdes et al. 2015). También se usa en el tratamiento de parásitos gastrointestinales (Salem et al.2017), en conejos para el control de la coccidiosis (Rivero-Perez et al.2019) y como tratamiento alternativo contra *Staphylococcus aureus* y *Listeria monocytogenes* (González-Alamilla et al.2019). La ventaja de usar extracto de *Salix babylonica* es que no tiene efectos negativos en la salud animal (Rivero et al.2016).

Por su sistema profundo de raíces y alta producción de biomasa, *Salix babylonica* es considerada una especie con gran potencial para el tratamiento de contaminantes presentes tanto en agua como en suelo (Li et al., 2015). Por ello ha sido evaluada su tolerancia a la presencia de diversos contaminantes. como el fenol y Mn bajo condiciones de hidroponía en laboratorio. Yang et al. (2015) comparo la tolerancia y acumulación de Mn de 24 clones del género, encontrando que un clon de

Salix babylonica mostro los mejores resultados. Li et al. (2015) evaluó el efecto de la presencia de fenol en el contenido de pigmentos fotosintéticos de la encontrando que estos disminuían a una concentración de 200 mg L⁻¹. Otros contaminantes tratados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Contaminantes tratados con *Salix babylonica* y eficiencia de remoción

Contaminante	Eficiencia de remoción (%)	Referencia
Etanol, benceno	99	(Corseuil and Moreno 2001)
Cianuro	95	(Ghasemi and Mokhtari 2013)
	≈19	(Yu et al. 2008)
Selenato	85.6	(Yu et al., 2006)
Selenito	15.6~30.6	
Metil <i>ter</i> -butil éter (MTBE)	100	(Yu and Gu 2006)
Ferrocianida	90	(Yu et al., 2008)
Cromo Cr (VI)	22	(Yu y Gu, 2008a)
Demanda química de oxígeno	14	(Sánchez-Sánchez et al. 2018)
Color	85	
Turbiedad	93	

Reforzar porque utilizar salix babylonica (que se va hacer en el trabajo) concentraciones

Concluir

Abundancia que tan tolerantes

Estudios de tolerancia

Capítulo 2. Justificación, Hipótesis y Objetivos

2.1 Justificación

El Estado de México es uno de los más poblados y alberga algunos de los corredores industriales más importantes de la República Mexicana, por ello es uno de los principales generadores de aguas residuales. La mayor parte de estas aguas residuales se utilizan en la agricultura o se vierten directamente en cuerpos de agua. Estas acciones generan problemas de salud y contaminación tanto de los cuerpos de agua como de los mantos acuíferos. Dada esta problemática se hace necesario el estudio y desarrollo de alternativas para la remoción de contaminantes de aguas residuales.

Salix babylonica ha demostrado ser eficiente bajo condiciones de laboratorio, en la disminución de color, turbidez y DQO (38%, 77% y 65% respectivamente) (Sánchez-Sánchez, 2012). Por esta característica y su amplia distribución en el Estado de México, *Salix babylonica* ha sido propuesta como una especie adecuada para su uso en la remoción de contaminantes.

Conocer la respuesta a impactos ambientales en condiciones naturales, mediante la evaluación de parámetros metabólicos y fenotípicos nos dará una base fisiológica y ecológica para comprender la tolerancia de *Salix babylonica* en diferentes ambientes contaminados. También nos permitirá evaluar la viabilidad de su uso en la remediación, así como la elección de fenotipos aptos, así como establecer prácticas de manejo y conservación de este.

2.2 Hipótesis

La tolerancia de *Salix babylonica* está relacionada a las condiciones de impacto ambiental en la que se encuentren los humedales. Esta tolerancia estará reflejada tanto en aspectos fenotípicos como en aspectos metabólicos.

2.3 Objetivo General

Determinar la tolerancia de *Salix babylonica* al relacionar sus características fenotípicas y metabólicas con las condiciones de impacto ambiental presentes en humedales del Valle de Toluca.

2.4 Objetivos Particulares

- Identificar en el valle de Toluca la distribución de *Salix babylonica* en humedales bajo condiciones de impacto ambiental.
- Caracterizar ejemplares *Salix babylonica* mediante características fenotípicas (altura, ancho del tronco, cobertura) y metabólicas (pigmentos fotosintéticos y tasa de asimilación neta)
- Determinar la calidad del agua de los humedales mediante el análisis de parámetros de calidad como pH, DQO, alcalinidad, nitratos, amoníaco, fosforo y conductividad.
- Asociar las condiciones de impacto ambiental y características biológicas de *Salix babylonica*.

Capítulo 3. Metodología

En la Figura 5 se muestra el esquema de la metodología.

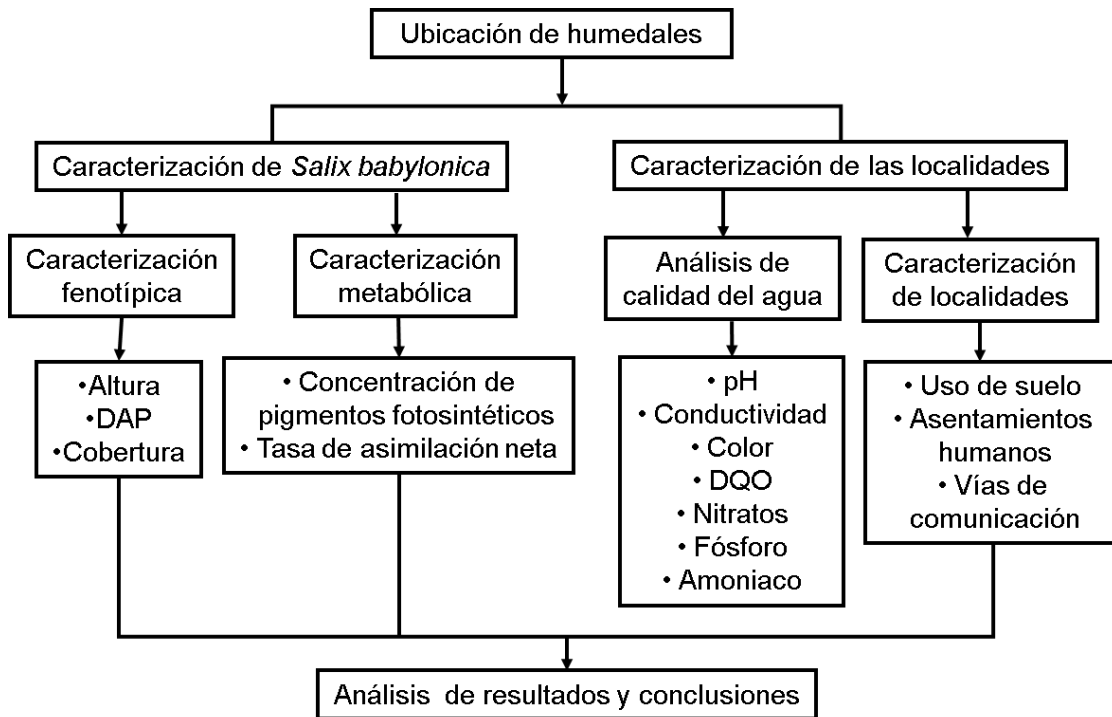


Figura 5. Esquema de la metodología

3.1 Ubicación y caracterización de las localidades

Para poder determinar las zonas de estudio, se realizó un muestreo dirigido en el Valle de Toluca para georreferenciar ejemplares de *Salix babylonica* (Figura 6). Posteriormente utilizando Sistemas de Información Geográfica se realizó un empalme para determinar zonas de alta densidad de *S. babylonica* asociadas a humedales. Se determinaron 6 zonas de estudio que se muestran en la Tabla 4.

Valle de Toluca

El Valle de Toluca, se localiza en la parte centro del Estado de México. Sus coordenadas geográficas son: Latitud 19° 42' 01'' 18° 59' 07'' Longitud 99° 56' 13'' 99° 16' 16''. La zona de estudio está

integrada por 23 municipios los cuales abarcan una superficie territorial de 2,946.22 Km² que corresponde al 13.09% del territorio estatal. (Fig. 4).

Hidrología. El Valle de Toluca, se localiza dentro del sistema hidrológico Lerma-Chapala-Santiago específicamente en la Región Curso Alto de la Alta Cuenca del Río Lerma (Región Hidrológica No.12)

Clima. El Valle de Toluca, de acuerdo con la clasificación climática de Köppen, modificada por E. García, están presentes principalmente tres tipos de clima: el templado, el semifrío con dos gradientes de humedad y el frío. El clima templado húmedo C(w) presenta verano largo, lluvia invernal inferior a 5%, es isotermal y la temperatura más elevada se manifiesta antes del solsticio de verano. Dentro del clima semifrío C (E) se presentan dos subtipos de clima, el primero: C (E) (W2) clima semifrío, subhúmedo, con porcentaje de precipitación invernal menor a 5%. El segundo subtipo, el C (E) (m), clima semifrío, húmedo, con verano largo isotermal, la lluvia de invierno es menor a 5% y la temperatura más alta se presenta antes del solsticio de verano, se localiza solamente en una porción del municipio de Xalatlaco. El tercer tipo de clima es el frío E (T) H, con temperatura media anual entre -2 y 5° C, y la del más frío es menor a 0° C. Es característico de zonas altas, como en el volcán Nevado de Toluca.

Durante la época de verano, el paso constante de ondas tropicales y la aproximación de ciclones tropicales son comunes. Tales sistemas meteorológicos contribuyen de acuerdo a su intensidad, con nublados y lluvias abundantes sobre la zona. De acuerdo con el Atlas de Inundaciones de la Comisión del Agua del Estado de México (CAEM) en 12 municipios existen 39 sitios con potencial de inundación.

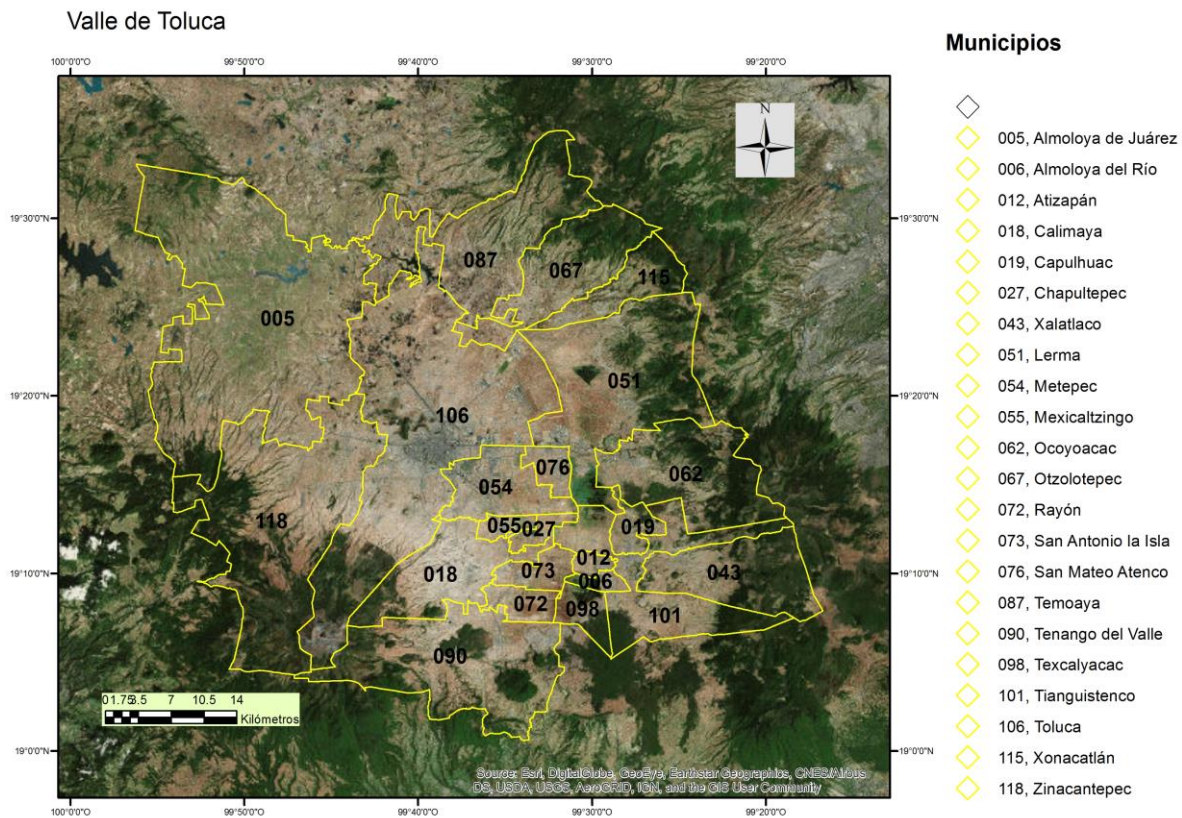


Figura 6. Municipios del valle de Toluca donde se realizó el muestreo

Tabla 5 Sitios de muestreo y su ubicación geográfica.

Localidad	Ubicación geográfica
Santa Juana 1 (SJ1)	19°22'54''N, 99°44'03''O
Santa Juana2 (SJ2)	19°22'42''N, 99°44'24''O
Mexicalcingo (MEX)	19°13'12''N, 99°35'22'' O
San Lucas Tunco (SLT)	19°13'34'' N, 99°32'03'' O
Almoloya (ALM)	19°21'53'' N, 99°45'19'' O
San Pedro Tultepec (SPT)	19°15'46'' N, 99°31'03'' O

3.2 Caracterización de las localidades

En cada una de las localidades, se realizó un muestreo durante el periodo de lluvias (octubre) y uno durante el periodo de estiaje (abril) para determinar parámetros de contaminación del agua de los humedales. Se obtuvieron muestras de 500 mL de cada cuerpo de agua, las cuales se mantuvieron en el laboratorio a 4°C; su caracterización fisicoquímica se realizó durante un periodo no mayor a 72 h después de haber sido colectada. Para la caracterización de las muestras se consideró: pH, alcalinidad CaCO₃, nitrógeno amoniacal, fósforo, nitratos, color y demanda química de oxígeno (DQO).

3.2.1 Alcalinidad, amoniacal, fósforo, nitratos y pH

Para estos parámetros se utilizó un Fotómetro Multiparamétrico HI 83200 marca HANNA. Alcalinidad se midió mediante el método colorimétrico. Amoniacal se midió mediante el método Nessler adaptado, fósforo sigue el método de ácido ascórbico adaptado. Para la determinación de nitratos sigue el método adaptado de Diazotización. Y para determinación de pH sigue el método adaptado de rojo clorofenol.

3.2.2 Color

El color del agua se debe a la presencia de minerales como hierro y manganeso, materia orgánica y residuos coloridos de la industria. Para la evaluación del color del agua se midió el color verdadero y/o aparente en una muestra de agua mediante su comparación y apreciación visual con una escala estandarizada de platino-cobalto. Dicha unidad es la que se produce al disolver 1mg de platino/L en forma de ion cloroplatinato, el color se midió con un espectrofotómetro HACH DR-4000.

3.2.3 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Es una medida cuantitativa de la cantidad de oxígeno requerida para la oxidación química de la materia orgánica. Siguiendo las técnicas y fórmulas descritas en la norma NMX-AA-030-SCFI-2001. Mediante espectrofotometría se cuantificó la cantidad de dicromato no reducido para determinar la cantidad consumida y calcular la materia oxidable en términos de oxígeno equivalente, la DQO. Para ello se utilizó un espectrofotómetro HACH DR-4000.

3.3 Caracterización de *Salix babylonica*

En cada sitio se midieron las características fenotípicas directamente en campo de ejemplares de *Salix babylonica*. Las características físicas que se midieron fueron: sexo de los individuos, altura (h), diámetro a altura del pecho (DAP) y cobertura. También se tomaron muestras de follaje para

determinar en laboratorio características metabólicas como concentración de pigmentos fotosintéticos (clorofila a, clorofila b y carotenos) y tasa de asimilación neta. La toma de muestras se realizó durante los meses de marzo, junio, septiembre y diciembre de 2018.

3.3.1 Sexo

Durante el muestreo se identificó el sexo de los individuos mediante la observación de la estructura de sus flores. Las flores se encuentran agrupadas en amentos: los individuos masculinos presentan flores pistiladas en amentos de entre 1,5 -2 cm de largo y de color amarillento mientras que los individuos los femeninos presentan amentos de 2 a 3 cm de largo y de color verdoso (Orwa et al. 2009).

3.3.2 Altura total

Se realizó utilizando un clinómetro digital Haglof. El cálculo de la altura se basa en el uso de la trigonometría para determinar el cateto opuesto. El cateto opuesto es igual al cateto adyacente dividido entre la tangente del ángulo de la hipotenusa. En el caso de medición de árboles el cateto adyacente sería la distancia que existe desde el observador (X) hasta el punto de medición; el ángulo (α) se obtiene con el clinómetro. Para obtener la altura total del árbol se debe agregar la altura (P) de la persona que realiza la medición. La altura (h) de árboles con distancias conocidas se obtiene mediante la ecuación (1):

$$h = X (\text{Tan}\alpha) + P \quad (1)$$

Donde:

h = altura total

Tan α = tangente de un ángulo

P = altura de la persona que realiza la medición

X= Distancia entre la persona y la base del árbol

3.3.3 Diámetro del tronco (DAP)

El diámetro del tronco del árbol se midió a una altura de 1.3 m de la superficie del suelo (DAP) utilizando una cinta diamétrica.

3.3.4 Cobertura

El diámetro de copa de cada árbol se determinó utilizando una cinta métrica, partiendo de la base del tronco como punto central hacia la punta de la copa en dirección a los cuatro puntos cardinales (Norte, Sur, Este, Oeste), obteniendo así un diámetro mayor y un diámetro menor los cuales se promediaron para la obtención del diámetro final de la copa del árbol.

3.4 Caracterización metabólica

3.4.1 Concentración de pigmentos fotosintéticos

Las muestras de tejido vegetal se colocaron en acetona 100% durante 24 h a 4°C en condiciones de oscuridad. Después de este tiempo se realizó la lectura de la absorbancia con un espectrofotómetro UV-Vis HACH DR 5000 a 470 nm, 645 nm y 662 nm que corresponden a la longitud de luz de la clorofila a (C_a), clorofila b (C_b) y carotenos (C_{x+c}). Como blanco se utilizó acetona al 100%. Las muestras se analizaron por triplicado. Mediante las ecuaciones (2)(3)(4)(5) propuestas por Lichtenthaler (1987) se cuantificó la concentración de clorofilas y carotenos. Posteriormente se clorofila total (C_{a+b}), relación C_{a+b}/C_{x+c} , relación C_a/C_b (Lichtenthaler, 1987)

(Lichtenthaler 1987).

$$C_a = 11.24A_{662} - 2.04A_{645}, \quad (2)$$

$$C_b = 20.13A_{645} - 4.19A_{662}, \quad (3)$$

$$C_{a+b} = 7.05A_{662} + 18.09A_{645}, \quad (4)$$

$$C_{x+c} = \frac{1000 A_{470} - 1.90 C_a - 63.14 C_b}{214}, \quad (5)$$

214

3.4.2 Tasa de asimilación neta (TAN)

Se tomaron muestras de 500 g de follaje tomado del estrato medio de la copa del árbol. Las hojas fueron colocadas en bolsas de papel en una estufa a 50°C durante 48 h. Posteriormente se pesaron para obtener el peso seco (PS). El área foliar (AF) se determinó utilizando el software libre ImageJ para análisis de imágenes (Rincón et al., 2012). Una vez obtenido el peso seco y el área foliar se calculó la tasa de asimilación neta (TAN) mediante la ecuación (6) (Villar et al., 2004).

$$TAN = \frac{(PS_2 - PS_1) (\ln AF_2 - \ln AF_1)}{(AF_2 - AF_1) (t_2 - t_1)}, \quad (6)$$

Donde:

Ln = logaritmo natural.

PS = peso seco de las muestras en t1 y t2.

AF = área foliar en el periodo

t1 y t2=tiempo

3.5 Análisis de datos

El análisis estadístico se realizó mediante el software STATGRAPHICS Centurion. Para determinar diferencias significativas entre localidades en cuanto a las características fenotípicas (altura, DAP y cobertura) se realizó un análisis de ANOVA. Para determinar si existe relación entre la localidad y la concentración de pigmentos fotosintéticos se realizó un análisis de ANOVA multifactorial. La tasa de asimilación neta (TAN) entre localidades y entre temporadas de muestreo, se evaluó mediante una prueba de Kruskal-Wallis.

Capítulo 4. Resultados y Discusión general

En el apartado 4.1 se muestra el artículo resultado del trabajo de investigación, en que se integran los resultados de la evaluación fenotípica y metabólica de 63 árboles adultos de *Salix babylonica*. En la evaluación fenotípica se midió el DAP, altura total y cobertura de la copa de los árboles. Estas características físicas son un indicador de producción de biomasa. Para prácticas de fitorremediación una característica deseable en las plantas utilizadas es que tengan una alta producción de biomasa; una alta producción de biomasa está relacionada con una alta tasa de evapotranspiración y por consiguiente una mayor remoción de contaminantes.

Para la evaluación de características metabólicas se midió la concentración de pigmentos fotosintéticos y la tasa de asimilación neta en cuatro periodos durante un año, esto con la finalidad de observar cambios estacionales. La concentración de pigmentos es un indicador que permite evaluar el estado fisiológico de una planta. Dicha concentración puede ser determinada por factores ambientales como la intensidad luminosa, cantidad de nutrientes y por factores de estrés (enfermedades, presencia de contaminantes). Por su parte la tasa de asimilación neta mide de manera indirecta la fotosíntesis realizada por la planta durante un intervalo de tiempo y nos indica la eficiencia fotosintética de la planta.

En el apartado 4.2. se muestra un artículo de revisión, que fue enviado a Trees Journal, sobre los usos del género *Salix* en Latinoamérica y México. Esta revista esta indizada en ISSN: 0931-1890 (Print) 1432-2285 (Online).

4.1 Capítulo de libro



Universidad Autónoma del Estado de México
Facultad de Química

Toluca, Estado de México a 21 de enero del 2020

Griselda Cruz
Moisés Tejocote
Patricia Balderas
Gabriela Roa
AUTORES DEL LIBRO
"TOPICOS EN CIENCIAS AMBIENTALES"
PRESENTE

Por medio del presente, tenemos el gusto de informarles que ha sido aceptado el capítulo "Salix babylonica para aplicaciones en fitorremediación: análisis de características biológicas en poblaciones del Valle de Toluca" para ser publicado en el libro "Tópicos en Ciencias Ambientales 2020".

Sin más por el momento, les agradecemos su valiosa colaboración y aprovechamos la ocasión para enviarles un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO"
"2020, Año del 25 Aniversario de los Estudios de Doctorado de la UAEM"

E. ALEJANDRA TEUTLI SEQUEIRA **VERÓNICA MARTÍNEZ MIRANDA**
CO-EDITORA DEL LIBRO

c.c.p. Archivo

Paseo Colón S/N,
Residencial Colón y Col Ciprés,
C.P. 50120 Toluca, México
Tel. (01 722) 226 23 00

FQ



***Salix babylonica* para aplicaciones en fitorremediación: análisis de características biológicas en poblaciones del Valle de Toluca**

Griselda Cruz¹, Patricia Balderas¹, Gabriela Roa³ y Moisés Tejocote^{2,*}

¹Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable UAEM-UNAM; patbh2003@yahoo.com.mx;

²Centro de Investigación en Ciencias Biológicas Aplicadas; moytej@yahoo.com.mx

³Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México; gabyroam@gmail.com

*Autor de correspondencia: moytej@yahoo.com.mx

Resumen: Para seleccionar clones aptos con aplicación en fitorremediación, se analizaron características fenotípicas y metabólicas de ejemplares de *Salix babylonica* presentes en seis localidades del valle de Toluca. Las características fenotípicas que se midieron fueron altura, diámetro del tronco, cobertura de la copa y el sexo de los individuos, mientras que las características metabólicas fueron la concentración de pigmentos fotosintéticos (clorofila a, clorofila b y carotenos) y la tasa de asimilación neta. También se evaluaron parámetros químicos del agua de los sitios donde se encuentran las poblaciones de *Salix babylonica*, tales como DQO, nitratos, fosfatos y amoníaco. Los resultados muestran que sólo habitan individuos femeninos en los sitios de muestreo y que sus características fenotípicas y metabólicas varían entre localidades, siendo los árboles de la localidad de San Lucas Tunco quienes presentaron los valores más altos de DAP, altura y cobertura. Todas las localidades mostraron valores por debajo de 4.0 g/mL en la relación clorofila total/carotenos. Esto significa que los diferentes fenotipos de los individuos muestran ventajas para aplicación en fitorremediación por habitar en condiciones de estrés o senescencia.

Palabras clave: clorofila; DAP; DQO; *Salix babylonica*; tasa de asimilación neta

1. Introducción

El acceso a agua potable es fundamental para el desarrollo socioeconómico, el bienestar ambiental y supervivencia de las comunidades humanas, porque de ella dependen las actividades productivas y la salud de estas. Sin embargo, el aumento demográfico ha incrementado el consumo y demanda de agua y con ello generado una reducción de los recursos hídricos, así como la contaminación de estos (Amprako, 2016). En México, los indicadores generales muestran que 73% de los cuerpos de agua del país están contaminados. Una de las principales fuentes de contaminación es la descarga de aguas residuales sin tratar en ríos, lagos y océanos, generando la degradación de sistemas acuáticos (Bunge 2010).

Salix babylonica para aplicaciones en fitorremediación: análisis de características biológicas en poblaciones del Valle de Toluca

Esta problemática ha llevado a la comunidad científica a desarrollar tecnologías innovadoras para el tratamiento de aguas residuales (Dhir, 2013). La fitorremediación o uso de especies vegetales para el tratamiento de aguas residuales ha surgido como una alternativa amigable con el ambiente y de bajo costo (Ali et al., 2003). Actualmente la investigación en este campo está orientada a hacer más eficientes los procesos de fitorremediación. Una forma de lograrlo es utilizando especies vegetales con una alta capacidad de acumulación y resistencia a los contaminantes.

Los árboles y arbustos pertenecientes al género *Salix*, conocidos comúnmente como sauces, son especies tolerantes a la presencia de contaminantes, por lo que han sido utilizadas en prácticas de fitorremediación (Kuzovkina and Volk, 2009; Mleczek et al., 2010). Esta tolerancia está relacionada con características fisiológicas y metabólicas propias del género como un periodo prolongado de crecimiento, alta producción de biomasa, sistema radicular profundo y alta densidad de raíces. Dichas características favorecen la evapotranspiración y con ello la remoción de contaminantes del suelo y agua. Entre los contaminantes tratados con alguna especie de sauce se encuentran compuestos orgánicos, sólidos suspendidos, patógenos, nutrientes y metales (Corseuil and Moreno, 2001; Li et al., 2015; Ramasamy, 2016; Shi et al., 2012; Truu et al., 2015; Wang et al., 2017).

La capacidad de remoción de contaminantes está determinada por diversos factores. Uno de ellos es la concentración del contaminante; por ejemplo, altas concentraciones de contaminante en el medio disminuye la eficiencia de remoción (Fischerová et al., 2006; Kubatová et al., 2016). Las condiciones del medio también influyen; por ejemplo en suelos inundados disminuye la biodisponibilidad de los metales pesados debido a la presencia de sulfuros y materia orgánica (Cao et al., 2017).

Otras características como el sexo del individuo, la especie de sauce y el origen del clon también influyen en la eficiencia de remoción. Liao et al.(2019) encontró que bajo condiciones de sequía el efecto negativo sobre la biomasa y el contenido de clorofila era menor en individuos femeninos de *Salix paraplesia* en comparación con individuos masculinos (Liao et al., 2019). Por otro lado, la especie de *Salix* también tiene efecto sobre la eficiencia de remoción; Mleczek (2017) analizó la eficiencia de remoción de Zn, Pb, y Cu de 145 especies de *Salix* encontrando que solo *Salix acutifolia* fue capaz de remover efectivamente los tres metales.

El origen del clon también tiene un efecto importante en la remoción de contaminantes. Bernardini (2016) encontró que los clones provenientes de zonas naturales tenían un mejor desempeño en presencia de diferentes concentraciones de Zn en comparación con clones comerciales (Bernardini et al. 2016).

Salix babylonica y sus aplicaciones en fitorremediación: análisis de características biológicas en poblaciones del Valle de Toluca

Salix babylonica es una especie dioica que se distribuye en el valle de Toluca (MEXU, 2019) y ha sido utilizada para la fitorremediación de diversos contaminantes (Ghasemi y Mokhtari, 2013; Li et al., 2015; Yu y Gu, 2007, 2008). Por ejemplo, Sánchez-Sánchez (2012), evaluó plantas de *Salix babylonica* en la remoción de contaminantes presentes en efluentes industriales bajo condiciones de laboratorio, obteniendo eficiencias de disminución de 38%, 77% y 65% en cuanto a color, turbidez y DQO respectivamente. Así mismo, reporta el incremento de área foliar proporcional al incremento de agua residual.

Entre los indicadores utilizados para la selección de clones más resistentes y productivos se encuentran: indicadores de crecimiento como altura, diámetro del fuste e indicadores de adaptación como concentración de clorofila, área foliar y tasa de asimilación neta (Corcuera et al., 2005). En este estudio se caracterizaron ejemplares de *Salix babylonica* presentes en humedales del valle de Toluca, mediante características físicas (altura, tamaño de la copa, ancho del tronco) y así como parámetros metabólicos como concentración de pigmentos fotosintéticos y como la tasa de asimilación neta (TAN) para poder determinar el estado de salud de los ejemplares. También se midieron parámetros de calidad de agua de los humedales para conocer las condiciones en que se desarrolla *Salix babylonica* y que nos permita elegir los fenotipos aptos para prácticas de fitorremediación.

2. Materiales y Métodos

2.1 Sitio de estudio

Se hizo un muestreo dirigido en el valle de Toluca para ubicar humedales donde hubiera presencia de *Salix babylonica*. Se ubicaron seis localidades del valle de Toluca, Estado de México: Santa Juana 1 (SJ1) 19°22'54''N, 99°44'03''O, Santa Juana 2 (SJ2) 19°22'42''N, 99°44'24''O, Mexicalcingo (MEX) 19°13'12''N, 99°35'22''O, San Lucas Tunco (SLT) 19°13'34''N, 99°32'03''O, Almoloya (ALM) 19°21'53''N, 99°45'19''O y San Pedro Tultepec (SPT) 19°15'46''N, 99°31'03''O. Posteriormente se realizaron muestreos durante los meses de marzo, junio, septiembre y diciembre en cada localidad para realizar la caracterización fenotípica y obtener muestras vegetales.

2.2 Características fenotípicas

En cada sitio se midieron las características fenotípicas de ejemplares de Sb. También se tomaron muestras de follaje para poder determinar características metabólicas. La toma de muestras se realizó durante los meses de marzo, junio, septiembre y diciembre del 2018. Para conocer la calidad del agua de los humedales se tomaron muestras durante la época de lluvias (octubre) y durante la época de

Salix babylonica para aplicaciones en fitorremediación: análisis de características biológicas en poblaciones del Valle de Toluca

estiaje (abril) para determinar parámetros de contaminación. Las características físicas que se midieron fueron: altura, diámetro a altura del pecho DAP.

2.2.1 Sexo de los individuos

Durante el muestreo se identificó el sexo de los individuos mediante la observación de la estructura de sus flores. Las flores se encuentran agrupadas en amentos: los individuos masculinos presentan flores pistiladas en amentos de entre 1,5 -2 cm de largo y de color amarillento mientras que los individuos los femeninos presentan amentos de 2 a 3 cm de largo y de color verdoso (Orwa et al. 2009).

2.2.2 Altura total

Se midió utilizando un clinómetro digital Haglof el cual mide el ángulo de inclinación (α) desde la base el árbol. El cálculo de la altura (h) se realizó mediante la ecuación (1):

$$h=X (\text{Tan } \alpha)+Ph, \quad (1)$$

Donde:

h = altura total

Tan α = tangente del ángulo

P = altura de la persona que realiza la medición

X= Distancia entre la persona y la base del árbol

2.2.3 Diámetro del tronco a altura del pecho (DAP)

El diámetro del tronco del árbol se medirá a una altura de 1.3 m de la superficie del suelo (DAP=diámetro a la altura del pecho) utilizando una cinta diamétrica.

2.2.4 Cobertura

El diámetro de copa de cada árbol se determinó utilizando una cinta métrica. Partiendo de la base del tronco como punto central hacia la punta de la copa en dirección a los cuatro puntos cardinales (Norte, Sur, Este, Oeste), obteniendo así un diámetro mayor y un diámetro menor los cuales se promediaron para la obtención del diámetro de copa final de cada individuo.

2.3 Caracterización metabólica

Se tomaron muestras de follaje de árboles adultos de *Salix babylonica*. Dichas muestras se tomaron de la parte media de la copa expuesta a la luz solar. Las muestras se analizaron a nivel laboratorio.

2.3.1 Determinación de pigmentos fotosintéticos

Las muestras de tejido vegetal se colocaron en acetona 100% durante 24 h a 4°C en condiciones de oscuridad. Después de este tiempo se midió la absorbancia con un espectrofotómetro UV visible HACH DR 5000 a 470, 645 y 662 nm que corresponden a la longitud de luz de la clorofila a (Chl a), clorofila b (Chl b) y carotenos (Cx+c). Como blanco se utilizó acetona al 100%. Las muestras se analizaron por triplicado. Mediante las ecuaciones propuestas por Lichtenthaler (1987) se obtuvo la concentración de las clorofilas y carotenos, así como clorofila total (Chl a+b), relación Chl a+b/Cx+c, relación Chl a/Chl b.

2.3.2. Tasa de asimilación neta (TAN)

Se tomaron muestras de 500 g de follaje tomado del estrato medio de la copa del árbol. Las hojas fueron colocadas en bolsas de papel en una estufa a 50°C durante 48 h. Posteriormente se pesaron para obtener el peso seco (PS). El área foliar (AF) se determinó de acuerdo a lo propuesto por Rincón (2012) utilizando el software libre ImageJ para análisis de imágenes (Rincón et al., 2012). Una vez obtenido el peso seco y el área foliar se calculó la tasa de asimilación neta (TAN) mediante la ecuación (2) (Villar et al., 2004).

$$TAN = (PS_2 - PS_1) (\ln AF_2 - \ln AF_1) / (AF_2 - AF_1) (t_2 - t_1), \quad (2)$$

Donde:

Ln = logaritmo natural.

PS = peso seco de las muestras en t1 y t2.

AF = área foliar en el periodo

t1 y t2=tiempo

2.4 Parámetros de calidad del agua

Se obtuvieron muestras de 500 mL de agua de cada una de las seis localidades, las cuales se mantuvieron en laboratorio a 4°C para su caracterización (físicoquímica). Para la caracterización de las muestras se consideró: alcalinidad CaCO₃, nitrógeno amoniacal, fósforo, nitratos, para lo cual se utilizó un Fotómetro Multiparamétrico HI 83200. La determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) se realizó con base a las técnicas y fórmulas descritas en la norma NMX-AA-030-SCFI-2001.

Los valores de referencia y las Normas de los parámetros DQO, alcalinidad CaCO₃, nitrógeno amoniacal, fósforo y nitratos, que se utilizaron para determinar el estado de los cuerpos de agua son los indicados en la Tabla 1 y 2 (CONAGUA 2015).

Tabla 1. Categorías la clasificación de cuerpos de agua de acuerdo con los valores de DQO.

Categoría	DQO (mg/L)
Excelente	≤ 10
Buena calidad	>10 y ≤ 20
Aceptable	>20 y ≤ 40
Contaminada	>40 y ≤ 200
Fuertemente contaminada	>200

Tabla 2. Normas mexicanas que indican los límites máximos permisibles para los parámetros evaluados.

Norma	Establece	Parámetro	Límite permisible
NOM-127-SSA1-1994	Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.	Alcalinidad CaCO ₃	300 mg/L
		Nitrógeno amoniacal	0.5 mg/L
		Nitratos	10 mg/L
NOM-001-ECOL-1996	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.	Fósforo	5-10 mg/L

2.5 Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó mediante el software STATGRAPHICS Centurion. Para determinar diferencias significativas entre localidades en cuanto a las características fenotípicas (altura, DAP y cobertura) se realizó un análisis de ANOVA. Para determinar si existe relación entre la localidad y la concentración de pigmentos fotosintéticos se realizó un análisis de ANOVA multifactorial. La tasa de asimilación neta (TAN) entre localidades y entre temporadas de muestreo, se evaluó mediante una prueba de Kruskal-Wallis.

Resultados y discusión

Durante la realización del estudio se realizaron cuatro muestreos para la obtención de muestras para cada sitio, excepto para la localidad de Almoloya, en la cual para el mes de diciembre los árboles ya no contaban con hojas. Se pudo realizar la caracterización fenotípica y metabólica de 68 ejemplares de *Salix babylonica* para cada uno de los sitios.

3.1 Caracterización fenotípica

3.1.1 Sexo

Al realizar el análisis de las flores de todos los individuos de *Salix babylonica* se determinó que todos los individuos pertenecían al sexo femenino. Al no identificar individuos masculinos no existe reproducción sexual de *Salix babylonica*. Aunque de manera natural existen poblaciones femeninas (Shafroth et al., 1994) y es reconocida la alta capacidad de reproducción vegetativa de los sauces (Budde et al., 2011) es altamente probable que la propagación de *Salix babylonica* sea resultado principalmente de la intervención humana.

Este resultado tiene fuertes implicaciones para el manejo de *Salix*, ya que la reproducción vegetativa en una población tiene genera una baja diversidad genética que se traduce en una alta susceptibilidad de los individuos a enfermedades. Existen reportes de incidencia del hongo *Melampsora epitea* en el 90% de una población de *Salix babylonica* (Reséndiz et al., 2018). Por lo cual sería necesario establecer programas de manejo que garanticen la diversidad genética.

3.1.2 DAP, altura y cobertura

La prueba de ANOVA mostro que existen diferencias significativas entre localidades para las variables DAP ($F=19.33$, $p<0.05$), h ($F=4.38$, $p<0.05$) y cobertura ($F=13.97$, $p<0.05$). Los valores promedio para cada variable se muestran en la tabla 3. La localidad de San Lucas Tunco fue la que mostró los valores más altos para las tres variables; la localidad de San Pedro Tultepec mostró los valores más bajos para altura (h) y DAP. La localidad de Santa Juana 2 mostró el valor más bajo para cobertura.

Tabla 3. Valores promedio y desviación estándar de las variables fenotípicas para cada localidad.

LOCALIDAD	n	DAP (cm)	h (m)	Cobertura (m ²)
Santa Juana 1	12	46.85 ± 13.40	11.38 ± 3.6	7.51 ± 2.99
Santa Juana 2	11	60.60 ± 11.85	10.56 ± 2.58	7.55 ± 1.57
San Pedro Tultepec	15	45.57 ± 9.44	10.10 ± 3.01	10.93 ± 2.01
Almoloya	10	61.93 ± 19.37	13.93 ± 3.68	10.44 ± 2.01
San Lucas Tunco	10	83.07 ± 9.8	13.99 ± 1.61	11.73 ± 2.19
Mexicalcingo	10	83.07 ± 18.49	13.41 ± 1.65	11.31 ± 1.41

3.2 Características metabólicas

3.2.1 Concentración de pigmentos

La prueba de ANOVA multifactorial muestra que los factores localidad y muestreo tienen un efecto sobre los valores de los parámetros Chl_a, Chl_b, C_{x+c}, Chl_{a+b}, Chl_{a+b} / C_{x+c} y Chl_a / Chl_b (Tabla 4).

Tabla 4. Análisis de varianza para Chl_a, Chl_b, C_{x+c}, Chl_{a+b}, Chl_{a+b} / C_{x+c} y Chl_a / Chl_b por localidad y muestreo.

Parámetro	Factor	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-p
Chl _a	Localidad	5	0.58	23.12	0.0000
	muestreo	3	0.39	15.87	0.0000
Chl _b	Localidad	5	0.049	9.3	0.0000
	muestreo	3	0.013	2.88	0.0367
C _{x+c}	Localidad	5	1.51	13.48	0.0000
	muestreo	3	1.45	12.99	0.0000
Chl _{a+b}	Localidad	5	0.89	19.83	0.0000
	muestreo	3	0.62	13.87	0.0000
Chl _{a+b} /C _{x+c}	Localidad	5	11.32	23.79	0.0000
	muestreo	3	3.70	7.79	0.0001
Chl _a /Chl _b	Localidad	5	20.05	7.72	0.0000
	muestreo	4	26.81	10.32	0.0000

La concentración de pigmentos es un indicador de salud de las plantas. Valores por debajo de 4.2 de la relación clorofila total/carotenos (Chl_{a+b}/C_{x+c}) estarían indicando daños al aparato fotosintético, estrés o senescencia (Brix, 1987). En este estudio, los valores promedio de la relación Chl_{a+b}/C_{x+c} por mes de muestreo y por localidad fueron menores a 3 (Tabla 5), encontrándose diferencias significativas entre

mes de muestreo ($H=16.08$, $p=0.0011$). Los valores son similares entre los meses de marzo, junio y diciembre mientras que los valores más bajos se presentan en el mes de septiembre (Figura 1). Entre localidades existen diferencias significativas para los valores de la relación (Chl_{a+b}/C_{x+c}) ($H=126.011$, $p=0$) (Figura 2). Se encontraron diferencias en los valores promedio entre las localidades para la relación Chl_a/Chl_b ($H=35.3018$, $p<0.05$) (Figura 3).

Tabla 5. Valores promedio y desviación estándar de la relación Chl_{a+b}/C_{x+c} (g/mL pf) por localidad y por muestreo.

Letras diferentes son significativamente diferentes (prueba LSD, $p < 0.05$).

Localidad		Muestreo	
ALM	2.50 ± 0.27^b	mar	2.33 ± 0.36^a
MEX	2.71 ± 0.93^b	jun	2.51 ± 0.30^a
SJ2	2.28 ± 0.22^b	sep	1.96 ± 0.97^b
SLT	2.19 ± 0.33^b	dic	2.54 ± 0.96^a
SPT	1.56 ± 0.86^a		
SJ1	2.86 ± 0.34^b		

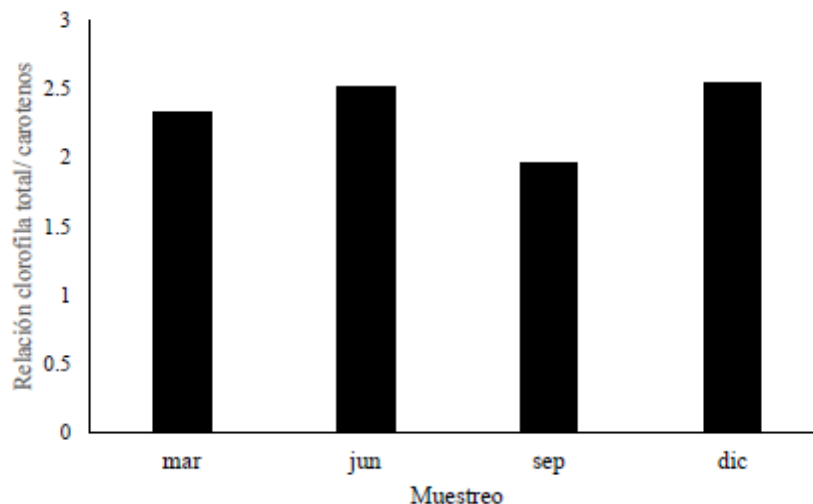


Figura 1. Relación clorofila total/ carotenos (Chl_{a+b}/C_{x+c}) por muestreo, pf=peso fresco.

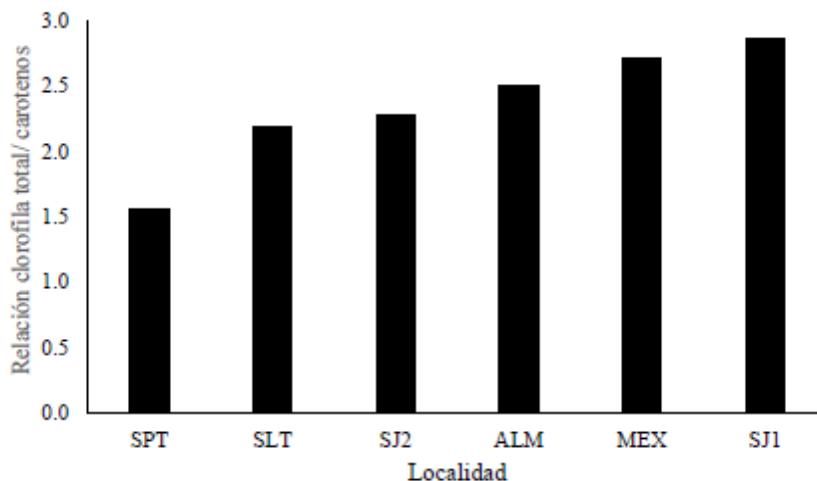


Figura 2. Relación clorofila total/ carotenos (Chl a+b/Cx+c) por localidad, pf=peso fresco.

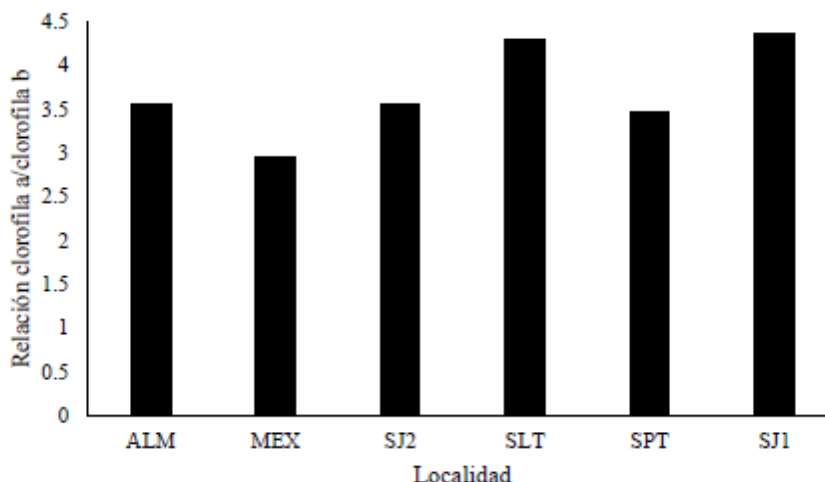


Figura 3. Relación clorofila a/clorofila b por localidad, pf=peso fresco.

La concentración de pigmentos fotosintéticos es un parámetro utilizado para evaluar el estado fisiológico de las plantas. Su concentración puede variar debido a diversos factores. La intensidad de radiación lumínica y la temperatura afectan la concentración de pigmentos; en los meses de alta temperatura o a mayor intensidad disminuye su concentración debido a sus efectos en los centros de reacción (Abbas et al. 2017; Diez et al., 2017). La calidad y cantidad de nutrientes presentes en el ambiente también afecta la concentración de clorofila, siendo mayor su concentración en ambientes ricos en nutrientes (Hepriyadi et al., 2019). Condiciones de estrés como enfermedades, contaminantes o

10

Griselda Cruz, Patricia Balderas, Gabriela Roa y Moisés Tejocote

salinidad también afectan la concentración de pigmentos en las plantas. Algunas enfermedades afectan el tejido donde se encuentran los cloroplastos afectando la concentración de pigmentos, siendo menor en plantas enfermas en comparación con plantas resistentes (Jabeen et al., 2017).

3.2.2 Tasa de asimilación neta (TAN)

El análisis de TAN muestra que las variaciones entre muestreos no son significativas ($H= 5.09$; $p>0.05$) (Figura 4). Entre localidades las variaciones son significativas ($H= 44.65$; $p<0.05$), siendo el valor más alto para la localidad de SJ2 ($0.059 \text{ kg m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) y el valor más bajo para la localidad de Almoloya (Figura 5). La prueba de LSD indica que los valores de TAN de Almoloya son similares a los valores de las localidades de Mexicalcingo y San Pedro Tultepec que mantienen su follaje durante todo el periodo de muestreo.

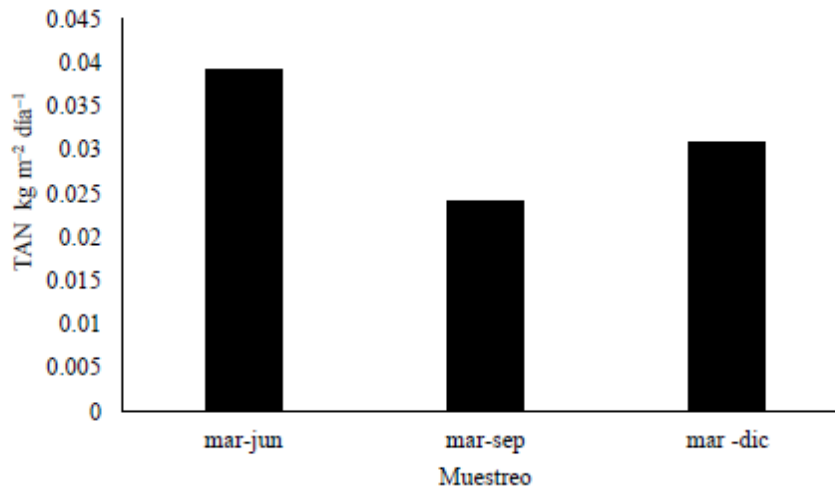


Figura 4. Tasa de asimilación neta (TAN) por muestreo.

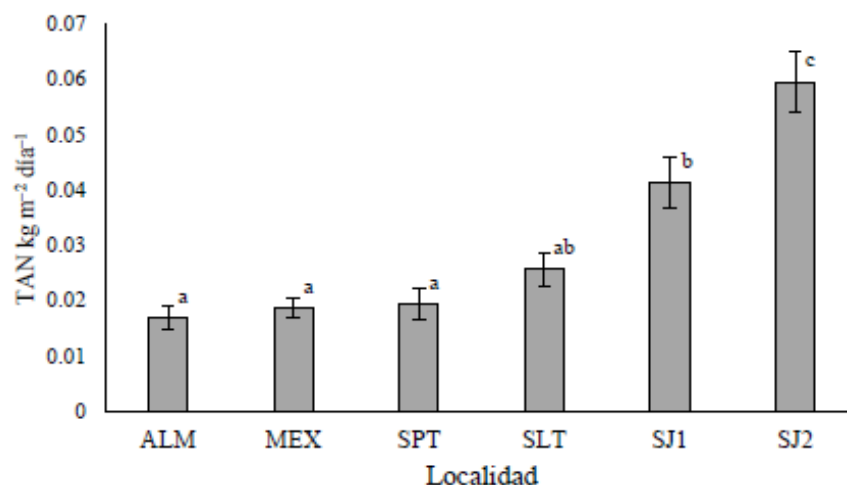


Figura 5. Tasa de asimilación neta (TAN) por localidad. Letras diferentes son significativamente diferentes (prueba LSD, $p < 0.05$).

3.3 Parámetros del agua

Los resultados del análisis de agua de cada localidad se muestran en la tabla 6. Los valores promedio de la época de estiaje son mayores en comparación a los valores en la época de lluvia. La NOM-127-SSA-1994 establece que los límites permisibles de alcalinidad en cuerpos de agua no deben ser mayores a 300 mg/L. De acuerdo con esa referencia las localidades de SLT y SPT presentan valores por encima de los límites permisibles. En cuanto al nitrógeno amoniacal, todas las localidades presentan valores por encima del límite permitido que es de 0.5 mg/L, siendo MEX y SLT las localidades con los valores más altos.

De acuerdo con la clasificación de CONAGUA (2015) de los cuerpos de agua con relación a los valores de DQO, las localidades de AL, MEX y SPT son cuerpos de agua contaminados, mientras que las localidades SJ1, SJ2 y SLT se encuentran dentro de la categoría de fuertemente contaminados.

Los valores de fósforo se encuentran por debajo del límite permisible que es de 5-10 mg/L en todas las localidades (NOM-001-ECOL-1996). Mientras que los valores de nitratos se encuentran por encima del límite permitido según la NOM-127-SSA1-1994.

Tabla 6. Valores promedio y desviación estándar para los parámetros de calidad del agua medidos para cada localidad durante la época de lluvia y la época de estiaje.

Localidad	Temporada	Parámetro				
		Alcalinidad CaCO ₃ (mg/L)	Nitrógeno amoniacoal (mg/L)	Fósforo (mg/L)	Nitratos (mg/L)	DQO (mg O ₂ /L)
Al	Lluvia	128.33 ± 2.89	0.35 ± 0.05	0.77 ± 0.06	4.43 ± 0.95	67.27 ± 15.01
	Estiaje	215 ± 20.41	5.85 ± 0.99	2.47 ± 0.24	11.3 ± 6.57	97.53 ± 2.31
SJ1	Lluvia	71.67 ± 7.64	0.35 ± 0.05	0	1.3 ± 0.82	132.60 ± 15.87
	Estiaje	110 ± 5.0	2.1 ± 0.67	3.6 ± 0.62	14.77 ± 4.47	326.87 ± 49.57
SJ2	Lluvia	101.67 ± 10.41	1.27 ± 0.18	1.43 ± 0.06	1.23 ± 0.23	158.60 ± 53.93
	Estiaje	146.67 ± 46.46	11.26 ± 5.7	1.83 ± 1.6	16.53 ± 4.5	332.20 ± 46.13
Mex	Lluvia	173.33 ± 2.89	12.10 ± 0.44	1.2 ± 0.10	5.63 ± (0.50)	93.3 ± 14.19
	Estiaje	272.50 ± 16.07	35.95 ± 1.35	4.7 ± 0.5	30.3 ± 3.42	157.53 ± 39.72
SLT	Lluvia	275 ± 8.66	17.08 ± 1.25	3.0 ± 0.78	3.4 ± 1.15	173.93 ± 32.52
	Estiaje	310 ± 5.0	35.83 ± 0.89	6.3 ± 0.17	43.73 ± 2.19	370.20 ± 61.02
SPT	Lluvia	250 ± 42.43	0.72 ± 0.26	1.4 ± 0.42	1.3 ± 0.28	115.6 ± 12.73
	Estiaje	540 ± 141.42	2.08 ± 0.18	3.95 ± 3.61	0.85 ± 1.2	93.2 ± 26.87

4. Conclusiones

El análisis realizado a las características descritas en este estudio muestra que existen diferencias entre localidades, es decir, los árboles de *Salix babylonica* con mejores características físicas (altura, DAP, cobertura) para prácticas de fitorremediación son los pertenecientes a la localidad de San Lucas Tunco en el municipio de Metepec. Esta localidad también está clasificada como fuertemente contaminada de acuerdo con los parámetros de DQO establecidos por CONAGUA. Sin embargo, los árboles han sobrevivido bajo estas condiciones hasta alcanzar tallas grandes, lo cual es un reflejo de la tolerancia de la especie a condiciones de estrés. Dichas condiciones de estrés también se ven reflejadas en los bajos valores de Chl a+b/Cx+c obtenidos en las seis localidades. Sin embargo, sería preciso realizar bioensayos *in situ* para profundizar su nivel de tolerancia.

En las seis localidades solo se observaron individuos femeninos, lo cual significa que la propagación de *Salix babylonica*, ha sido mediante propagación vegetativa humana y, por lo tanto, se asume que existe una baja diversidad genética en las poblaciones. En este sentido es necesario realizar análisis de DNA para determinar si los individuos son genéticamente diferentes entre las seis localidades o son clones y si las diferencias metabólicas y fenotípicas encontradas entre ellas, son el resultado de las condiciones ambientales en donde se desarrollan.

Referencias

- Abbas, Z.K., Saggi, S., Rehman, H., Al Thbiani, A., Ansari, A.A. Ecological variations and role of heat shock protein in *Artemisia judaica* L. in response to temperature regimes of Tabuk, Saudi Arabia. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2017, 24, 1268–1273. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.01.001>
- Ali, M.B., Vajpayee, P., Tripathi, R.D., Rai, U.N., Singh, S.N., Singh, S.P. Phytoremediation of lead, nickel, and copper by *Salix acmophylla* Boiss.: Role of antioxidant enzymes and antioxidant substances. *Bulletin Environmental Contamination Toxicology*, 2003, 70, 462–469. <https://doi.org/10.1007/s00128-003-0009-1>
- Amprako, J. L.. The United Nations World Water Development Report 2015. *Future of Food: Journal on Food, Agriculture and Society*, 2016, 4(2), 64-65.
- Bernardini, A., Salvatori, E., Di Re, S., Fusaro, L., Nervo, G., Manes, F. Natural and commercial *Salix* clones differ in their ecophysiological response to Zn stress. *Photosynthetica*, 2016, 54, 56–64. <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0155-9>
- Brix, H., 1987. Chlorophylls and carotenoids in plant material. *Methods* 3–5. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-378630-2.00039-6>
- Budde, K.B., Gallo, L., Marchelli, P., Mosner, E., Liepelt, S., Ziegenhagen, B., Leyer, I. Wide spread invasion without sexual reproduction? A case study on European willows in Patagonia, Argentina. *Biological Invasions*, 2011, 13, 45–54. <https://doi.org/10.1007/s10530-010-9785-9>
- Bunge, V. El estado de saneamiento en las cuencas de México. Las cuencas hidrográficas de México: diagnóstico y priorización. México: INE, 2010, 92-5
- Cao, Y., Ma, C., Chen, G., Zhang, J., Xing, B. Physiological and biochemical responses of *Salix integra* Thunb. under copper stress as affected by soil flooding. *Environmental Pollution*, 2017, 225, 644–653. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.03.040>
- CONAGUA. Sistema Nacional de Información del Agua (SINA). Calidad del agua. Reporte. Escalas de clasificación de la calidad del agua y redes de monitoreo. 2015
- Corcuera, L., Maestro, C., Notivol, E. La ecofisiología como herramienta para la selección de clones más adaptados y productivos en el marco de una selvicultura clonal con chopos. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 2015, 14, 394–407.
- Corseuil, H.X., Moreno, F.N. Phytoremediation potential of willow trees for aquifers contaminated with ethanol-blended gasoline. *Water Resource* 2001. 35, 3013–3017. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00588-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00588-1)
- Dhir, B. Phytoremediation: Role of Aquatic Plants in Environmental Clean-Up. Springer, New Delhi. 2013.

Salix babylonica para aplicaciones en fitorremediación: análisis de características biológicas en poblaciones del Valle de Toluca

<https://doi.org/10.1007/978-81-322-1307-9>

Diez, M.C., Moreno, F., Gantiva, E. Effects of light intensity on the morphology and CAM photosynthesis of *Vanilla planifolia* Andrews. *Revista Facultad Nacional Agronomía*, 2017, 70, 8023–8033. <https://doi.org/10.15446/rfna.v70n1.61736>

Fischerová, Z., Tlustoš, P., Jiřina Száková, Kornelie Šichorová. A comparison of phytoremediation capability of selected plant species for given trace elements. *Environmental Pollution*, 2006, 144, 93–100. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.01.005>

Ghasemi, R., Mokhtari, R. Resistance to cyanide by salicylate pretreatment in *Salix babylonica* L. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 2013, 25, 275–282.

Hepriyadi, S.U., Kurniawati, I.D., Prihasty, W., Cordova, H. Analysis of AB nutrient film technique variation towards chlorophyll concentration of lettuce (*Lactuca sativa*) on integrated hydroponic system. *AIP Conference Proceedings*, 2019, 2088, 1–5. <https://doi.org/10.1063/1.5095349>

Jabeen, A., Tv, K., Subrahmanyam, D., Di, L., Bhagyanarayana, G., Krishnaveni, D. Variations in Chlorophyll and Carotenoid Contents in Tungro Infected Rice Plants. *Journal of Ressearch Develoment*, 2017, 2017, 1–7. <https://doi.org/10.4172/2311-3278.1000153>

Kubatová, P., Hejzman, M., Száková, J., Vondráckova, S., Tlustoš, P. Effects of Sewage Sludge Application on Biomass Production and Concentrations of Cd, Pb and Zn in Shoots of *Salix* and *Populus* Clones: Improvement of Phytoremediation Efficiency in Contaminated Soils. *Bioenergy Resources*, 2016, 9, 809–819. <https://doi.org/10.1007/s12155-016-9727-1>

Kuzovkina, Y.A., Volk, T.A. The characterization of willow (*Salix* L.) varieties for use in ecological engineering applications: Co-ordination of structure, function and autecology. *Ecological Engineering* 2009, 35, 1178–1189. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.03.010>

Li, H., Zhang, G.C., Xie, H.C., Li, K., Zhang, S.Y. The effects of the phenol concentrations on photosynthetic parameters of *Salix babylonica* L. *Photosynthetica*, 2015, 53, 430–435. <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0135-0>

Liao, J., Song, H., Tang, D., Zhang, S. Sexually differential tolerance to water deficiency of *Salix paraplesia* —A female-biased alpine willow. *Ecology Evolution*, 2019, 9:8450–8464. <https://doi.org/10.1002/ece3.5175>

Lichtenthaler, H.K. Chlorophylls and Carotenoids: Pigments of Photosynthetic Biomembranes. *Methods Enzymology*, 1987, 148, 350–382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)

MEXU, H.N. de M. Departamento de Botánica, Plantas vasculares [WWW Document]. Portal datos abiertos UNAM. URL <http://datosabiertos.unam.mx/IBUNAM:MEXU:1161651> (accessed 3.19.19).

Salix babylonica para aplicaciones en fitorremediación: análisis de características biológicas en poblaciones del Valle de Toluca

- Mleczeck, M., Rutkowski, P., Rissmann, I., Kaczmarek, Z., Golinski, P., Szentner, K., Strazyńska, K., Stachowiak, A. Biomass productivity and phytoremediation potential of *Salix alba* and *Salix viminalis*. *Biomass and Bioenergy*, 2010, 34, 1410–1418. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.04.012>
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-Semarnat-1996. Diario oficial de la Federación, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. 1997
- Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano (Modificación). Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización. Diario Oficial de la Federación, 16 de diciembre de 1999. México
- Norma Oficial Mexicana NMX-AA-030-SCFI-2001. Análisis de agua – determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba. Diario Oficial de la Federación, 17 de abril de 2001. México.
- Orwa C, M.A., Kindt, R., Jamnadass, R., Simons, A. *Salix babylonica*, in: Agroforestry Database: A Tree Reference and Selection Guide Version 4.0. 2009, pp. 1–5.
- Ramasamy, E.V. Decontamination of wastewater with phytoremediation. *South Indian Journal of Biological Sciences*, 2016, 2, 84–87.
- Reséndiz, J.F., Guzmán, L., Muñoz, A.L., Nieto de Pascual, C., Olvera, L.P. Enfermedades foliares del arbolado en el Parque Cultural y Recreativo Tezozómoc, Azcapotzalco, D.F. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2018, 6, 106–123. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v6i30.211>
- Rincón, N., Olarte, M.A., Pérez, J.C. Determinación del Área Foliar en Fotografías Tomadas con una Cámara Web, un Teléfono Celular o una Cámara Semiprofesional. *Revista de la Facultad Nacional de Agronomía, Medellín*, 2012, 65, 6399–6405.
- Sánchez-Sánchez, A., Tejocote-Pérez, M., Fuentes-Rivas, R. M., Linares-Hernández, I., Martínez-Miranda, V. And Fonseca-Montes De Oca, R. M. G. Treatment of a textile effluent by electrochemical oxidation and coupled system electrooxidation– *Salix babylonica*. *International Journal of Photoenergy*, 2018, 2018: 1–12.
- Shafroth, P.B., Scott, M.L., Friedman, J.M., Laven, R.D. Establishment, Sex Structure and Breeding System of an Exotic Riparian Willow, *Salix x rubens*. *American Midland Naturalist*, 1994, 132, 159-172 <https://doi.org/10.2307/2426210>
- Shi, X., Leng, H., Hu, Y., Liu, Y., Duan, H., Sun, H., Chen, Y. Removal of 2,4-dichlorophenol in hydroponic solution by four *Salix matsudana* clones. *Ecotoxicology Environmental Safety*, 2012, 86, 125–131. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.09.002>
- Solarte, M. E., Moreno, L., & Melgarejo, L. M. Fotosíntesis y pigmentos vegetales. In L. . Melgarejo (Ed.), *Griselda Cruz, Patricia Balderas, Gabriela Roa y Moisés Tejocote*

Salix babylonica para aplicaciones en fitorremediación: análisis de características biológicas en poblaciones del Valle de Toluca

Experimentos en fisiología vegetal. Universidad Nacional de Colombia. 2010, pp. 107–122. Bogotá:

- Truu, J., Truu, M., Espenberg, M., Nõlvak, H., Juhanson, J. Phytoremediation And Plant-Assisted Bioremediation In Soil And Treatment Wetlands: A Review. *Open Biotechnology Journal*, 2015, 9, 85–92. <https://doi.org/10.2174/1874070720150430E009>
- Villar, R., Ruiz-Robledo, J., Quero, J.L., Poorter, H., Valladares, F., Marañón, T. Tasas de crecimiento en especies leñosas: aspectos funcionales e implicaciones ecológicas, *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*, 2004, 191-227.
- Wang, L., Ji, B., Hu, Y., Liu, R., Sun, W., 2017. A review on in situ phytoremediation of mine tailings. *Chemosphere*, 2017, 184, 594–600. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.025>
- Yu, X.Z., Gu, J.D. Effects of available nitrogen on the uptake and assimilation of ferrocyanide and ferricyanide complexes in weeping willows. *Journal of Hazard. Materials*, 2008, 156, 300–307. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.12.020>
- Yu, X.Z., Gu, J.D. Metabolic responses of weeping willows to selenate and selenite. *Environmental Science and Pollution Research*, 2007, Res. 14, 510–517. <https://doi.org/10.1065/espr2007.04.407>

4.2 Artículo enviado

Trees Editorial Manager®

HOME • LOGOUT • HELP • REGISTER • UPDATE MY INFORMATION • JOURNAL OVERVIEW
MAIN MENU • CONTACT US • SUBMIT A MANUSCRIPT • INSTRUCTIONS FOR AUTHORS • PRIVACY

Role: Author Username: MTejocote-Pérez-468

Submissions Being Processed for Author Moisés Tejocote-Pérez, DR

Page: 1 of 1 (1 total submissions) Display 10 results per page.

Action ▲	Manuscript Number ▲▼	Title ▲▼	Initial Date Submitted ▲▼	Status Date ▲▼	Current Status ▲▼
Action Links	TSAF-D-19-00483	Uses of the Salix genus in Latin America and Mexico	09 Dec 2019	09 Dec 2019	Submitted to Journal

Uses of the *Salix* genus in Latin America and Mexico

Griselda Cruz-Ruiz¹, Moisés Tejocote-Pérez^{2*}, Patricia Balderas-Hernández¹, Gabriela Roa-Morales¹, José Adrián Silis-Cano², Ricardo Lara-Ramírez².

¹Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable UAEM-UNAM, Universidad Autónoma del Estado de México. Carretera Toluca-Ixtlahuaca km 14.5, Toluca, Estado de México

²Centro de Investigación en Ciencias Biológicas Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de México. Carretera Toluca-Ixtlahuaca km 14.5, Toluca, Estado de México.

Email: gzy2737@hotmail.com, mtp@uaemex.com, patbh2003@yahoo.com, gabyroam@gmail.com, adrian.silis07@gmail.com, rlarar@uaemex.mx.

*Correspondence: Laboratorio de Biotecnología Microbiana. Centro de Investigación en Ciencias Biológicas Aplicadas. Universidad Autónoma del Estado de México. Carretera Toluca-Ixtlahuaca km 14.5, Toluca, Estado de México. +52 (722)462-85-85 E-mail: moytej@yahoo.com.mx

Abstract The genus *Salix* includes species of shrubs and trees widely distributed. It has traditionally been an important forest resource for communities around the world. The objective of this work was through a literature review to identify the uses of the *Salix* genus around the world and compare it with the uses in Latin America. The uses of *Salix* trees were grouped into three categories: phytoremediation, biomass production and biological engineering. *Salix viminalis* is the most mentioned species, especially for use in phytoremediation. In Latin America, the main use is the cultivation of tree species such as *S. alba*, *S. amygdaloides*, *S. babylonica*, *S. matsudana* and *S. nigra* to obtain cellulose and wood, mainly in Argentina and Brazil. In Chile, *S. viminalis* is cultivated for the elaboration of handicrafts, while in Mexico, the use of *S. babylonica* as a food additive for livestock is studied. Studies of phytoremediation with *Salix* in Latin America are scarce compared to countries in Europe and Asia.

Keywords: bioengineering, biomass production, phytoremediation, restoration, willow

Key Message In Latin America, fewer *Salix* species are used primarily in biomass production compared to countries such as Sweden and China.

Introduction

The *Salix* genus comprises about 450 species distributed in both the northern and southern hemispheres. Its possible biodiversity center is probably in China, with about 275 species, from which 189 are endemic (Argus 1999; Karp et al. 2011). Historically, the use of *Salix* species has had a significant impact on human health, jobs, commerce and culture in general. They are also valued for their role in serving as a refuge for some animals and protection of soil erosion (Colobig 2012; Hernández et al. 2010; Richardson et al. 2014). Currently, *Salix* has been recognized by its potential use in phytoremediation in soil and water (Guidi Nissim and Labrecque 2016; Mleczek et al. 2017), and by its role in CO₂ reduction from the atmosphere (Dimitriou and Mola-Yudego 2017). Because of this, the United Nations Organization for Food and Agriculture (FAO), through the International Poplar Commission (IPC), encourages cultivation, use, and conservation of trees within the family Salicaceae, including *Salix* (FAO, 2016).

Species of this genus are common in riparian habitats, and many have adapted to hypoxic conditions in wetlands. *Salix* species are also typical in early stages of species succession in perturbed environments such as flooded or burned habitats, abandoned crop fields, barren forests due to deforestation, or along the sides of roads, so that *Salix* species are considered a pioneer species (Datri et al. 2015; Kuzovkina et al. 2008).

Due to their characteristics, willows have been proposed for use in environmental conservation projects, including phytoremediation, biomass production and biological engineering (Kuzovkina and Quigley 2005; Wani et al. 2011). Although the goal of phytoremediation is ecosystem restoration, we refer phytoremediation to studies specifically aimed at the extraction or stabilization of a pollutant.

For use in ecological restoration, we refer to the studies related to the restoration of environments with some type of disturbance either climatic or anthropogenic that are not related to pollution. For the use of biomass production, the studies are addressed to plantations whose objective is only the obtaining of biomass. Some of the *Salix* species used are shown in Table 1. From these, only seven are widely used (Figure 1). Due to their biological characteristics, species appear in more than one category at the same time.

[Fig 1.]

Phytoremediation

The high infrastructure and operation costs of the contaminated water treatment systems, as well as the methods of cleaning contaminated soils, have promoted the implementation of alternative methods (Ramasamy 2016). A sustainable and low-cost alternative is phytoremediation, which is the use of plants to extract, stabilize, remove, transform and immobilize contaminants (Dhir 2013; Rahman et al. 2015; Ramasamy 2016; Zheng et al. 2016). Among the plant species widely used in phytoremediation processes, we have the species of the genus *Salix* (Barbosa et al. 2016; Brereton et al. 2016; McBride et al. 2016).

The sauces have biological and ecological properties that favor the remediation of contaminated environments, such as a broad and deep root system that favors evapotranspiration. They are also fast-growing species tolerant to the presence of pollutants capable of growing in nutrient-poor soils or environments with recurrent flooding (Purdy and Smart 2008; Shi et al. 2012; Thomas and Rodriguez 2014; Zhivotovsky et al. 2011). That is why the species of the genus *Salix* have been used

in phytoremediation studies for a wide variety of pollutants (Jama-Rodzeńska et al. 2016; Janssen et al. 2015; Kuzovkina and Volk 2009; Marmioli et al. 2011; Mleczek et al. 2010).

Among the most common treated contaminants with some species of willow we have nutrients, metals, suspended solids, pathogens and organic compounds (Table 2) (Corseuil and Moreno 2001; Li et al. 2018; Ramasamy 2016; Shi et al. 2012; Truu et al. 2015; Wang et al. 2017). The use of *Salix* has shown high removal rates in the treatment of nutrient-rich wastewater under laboratory conditions, 87.78% nitrogen, 65.58% for phosphorus and 59.90% for chemical oxygen demand (Shi et al. 2016). In Chinese rural communities, an ecotechnology called artificial floating island (AFI) has been implemented for nutrient removal that uses a combination of plant species, including *Salix babylonica* (Zhu et al. 2011).

[Table 2]

Most *Salix* taxa are tolerant to the presence of metals in both soil and water which is why they have been commonly used in the remediation of environments contaminated with Zn, Pb, Cd and Cu. These elements are found both in soil and water from anthropogenic practices such as agriculture and industrial processes, mining and the application of sewage sludge. (Dhir 2013; Kabata-Pendias and Szeke 2015). Mleczek (2017) analyzed the characteristics and phytoextraction capacity of Cu, Pb and Zn soil from 145 *Salix* taxa, finding that the only species capable of accumulating the three metals was *S. acutifolia* (S124) (Mleczek et al. 2017).

Salix taxa is also capable of remove contaminants that are difficult to degrade such as polychlorinated biphenyls (PCBs), hydrocarbons and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). The removal capacity of *Salix* is defined by the rhizosphere-microbial community interactions. Compounds such as phytoalexins, salicylic acid and flavonoids present in willow root extracts inducing the expression of resistance genes against contaminants in bacteria and fungi, determining in this way the diversity

and abundance of the microbial community (Pagé et al. 2015). This interaction favors hydrocarbon degradation through carbon and nitrogen used by microorganisms. Among the microorganisms found in the *Salix* rhizosphere, we have *Actinomycetales*, *Rhodospirillales*, *Burkholderiales*, *Alteromonadales*, *Solirubrobacterales*, *Caulobacterales* and *Rhizobiales*, *Sphingomonadales*, and *Sphingobacterales* (Pagé et al. 2015), *Alphaproteobacteria*, *Beta-proteobacteria*, *Gamma-proteobacteria* and *Acido-bacteria* (Yergeau et al. 2014). On the other hand, the possibility of increasing the activity of the native microbial community by inoculation of other microorganisms like *Pseudomonas aeruginosa* has been evaluated, with an efficiency of 67% in petroleum removal detected (Zhang et al. 2017).

The efficiency to remove contaminants is related to several factors including the *Salix* species. For example, Vassilev (2007) found that *S. alba* is more tolerant of excess Zn in the environment than *S. viminalis* (Vassilev et al. 2007). It has also been observed that clones selected from contaminated sites show a higher efficiency in the removal of metals than commercial clones. For example, *S. alba* clones that come from natural populations perform better in the presence of Zn compared to commercial clones (Bernardini et al. 2016). There are also variations in specific parts of the plant (root, stem or leaves) where the pollutant accumulates (Terebova et al. 2017). Elements such as Pb, Cd, and as accumulate mainly in the roots (Nikolić et al. 2015; Zhivotovsky et al. 2011), while *Salix babylonica*, accumulates mainly in the roots. Pollutants can also be translocated in small concentrations to the aerial parts (Sylvain et al. 2016). However, for phytoremediation practices, it is recommended to use plants that accumulate metals in the roots, since in this way the contaminants are immobilized preventing their mobilization to the surrounding environment. Another factor that determines the efficiency of *Salix* in the removal is the concentration of the contaminant. Fischerová et al. (2006) and Kubatová et al. (2016) observed that the removal efficiency decreases with the increase of the contaminant in the environment. Also, since *Salix* is a riparian species, floods affect

the removal of pollutants since they cause the decrease of the bioavailability of heavy metals due to the presence of sulfides and organic matter (Cao et al. 2017).

The efficiency *Salix* presents for the removal of pollutants is lower in comparison with plants classified as hyperaccumulators. For example, *Thlaspi caerulescens* accumulates 5.3 mg kg⁻¹ of As while *Salix dasyclados* accumulate 0.964 mg kg⁻¹ (Fischerová et al. 2006). However, the total extract amounts of pollutants removed may be comparable due to the high biomass production of *Salix* (Ma et al. 2001; Purdy and Smart 2008; Yanitch et al. 2017). Due the high biomass production and its capacity to extract contaminants, *Salix* plantations have been established in specific sites to exploit wastewater and sludge obtained from treatment plants (Melin et al. 2004). This plantation is also established in soils that are not suitable for food crops because of salinization, compaction or contamination by pesticides and metals. From this type of plantation raw material is obtained for the paper industry and burning material to produce electricity (Dillen et al. 2016; Pandey et al. 2016).

Biomass production

The global demand for energy has favored the implementation of alternative energy sources to fossil fuels. In the agreements signed at the UN Climate Conference (COP21), in December 2015, it was suggested that renewable and low-carbon energies should replace fossil fuels. To achieve this, the forestry production of fast-growing and high-biomass species such as willows should be taken into consideration (Rhodes 2016).

As a Renewable Energy Unconventional source (ERNC) willow wood can be used as a biofuel or directly to produce electricity through combustion (Alonso et al. 2010; Hauk et al. 2014; Morales-Salinas et al. 2015; Pinilla et al. 2015; Rudnick et al. 2011; Tripathi et al. 2016; Volk et al. 2016). In the production of biofuel, lignocellulosic biomass is used to produce bioethanol. Nowadays, it is

sought to produce bioethanol, by adding enzymes such as cellulast and viscozyme for the hydrolysis of lignocellulosic biomass and processes such as saccharification to improve yield (Kim et al. 2011).

The cultivation of *Salix* is based on a short rotation crop system (SRC) that consists in harvesting biomass in short periods of between 2-5 years and replace them when productivity decreases reaching yields of up to 8-10 tons of dry matter/ha/year being viable between 25 and 30 years. Among the most suitable species for SRC we have *S. viminalis*. For the cultivation of willows, specific characteristics of high biomass productivity are sought, however, when using the highest yielding clones, a low diversity is generated in the crops, making them prone to pests (Moritz et al. 2017). For this reason, countries such as Sweden, Canada, the United Kingdom and the United States have promoted the development of *Salix* production systems through institutions specializing in genetic improvement (Kuzovkina et al. 2008).

Biological engineering

The continuous population growth has caused an increase in pollution and a high impact on ecosystems. The speed at which these impacts occur prevents ecosystems from restoring themselves naturally. New technologies have been implemented to recover and rebuild damaged ecosystems by orienting their capacity for self-regulation (Clewel et al. 2004). In these processes a highly important step to take in account is to use native plants with specific characteristics for the restoration of vegetation in a certain area. (Chen et al. 2016; Laskurain et al. 2016).

Willows have been used as windbreaks and live fences to protect crops from erosion; they reduce the loss of moisture through evaporation and in some places, they act as a shelterbelts against snow slides (Kuzovkina and Volk 2009). In addition, its extensive and deep root system provides mechanical support to stabilize slopes and control water and wind erosion, desertification and sandification (Kuzovkina and Quigley 2005). For this purpose, willow cuttings are used in different positions to

form different bioengineering structures. Rey et al. (2015) proposed and analyzed 672 structures to control the erosion of gullies in the Southern Alps, France in which the arrangement of cuttings (planted vertically or obliquely) varied in relation to sediment transit. Also, the cuttings are transplanted with the technique of straw chess board to restore alpine grasslands and show cash in the control of desertification (Kang et al. 2015; Liu and Bo 2020).

Uses of willows in Latin America

S. humboldtiana is the only species native to the American continent, however, several other exotic species have adapted to environmental conditions. The interchange of *Salix* species between continents occurred during the colonial period, thus, species like *S. babylonica*, native to China, were propagated during this period (Kuzovkina et al. 2008; Ugarte et al. 2011). Other species have been propagated for their use in human activities like *S. viminalis*, which is utilized for basketry, or *S. alba* that is utilized in box fabrication (Dickmann and Kuzovkina 2014; Méndez 2012).

In Latin America willows are used for biomass production mainly in Argentina and Brazil. The species used for this purpose are mainly species classified as exotic or commercial hybrids. Argentina is the Latin-American country with the most significant surface of willow crop fields, estimated in 65,000 ha. The main use of willows in Argentina is the biomass generation. Most part is destined to the elaboration of cellulosic paste; this means that the paper industry is one of the most important industries in Argentina. A smaller portion of crop fields, approximately 200 ha, is destined to the elaboration of handicrafts (Area and Popa 2014), and in smaller proportion, are used as fuels (Cardoso et al. 2013; Thomas and Cerrillo 2014). *S. alba*, *S. amygdaloides*, *S. babylonica*, *S. matsudana* and *S. nigra* are used the most (Comisión Nacional del Álamo de Argentina 2016).

Thus, the main challenge of willow crops in Argentina is to obtain higher biomass. However, its productivity is related to the willow genetic variability, as well as to the cultivation site (Casaubon et

al. 2016; Cerrillo 2011; Cobas et al. 2014; Monteoliva and Cerrillo 2013; Villegas et al. 2009). The National Institute of Agricultural Technology (INTA), together with the National Institute of Seeds (INASE), are dedicated to the identification of plague-resistant and highly productive genetic material, as well as to the registration of clones in the National Register of Cultivars of Argentina. In addition, several studies have focused on the identification of pests such as rust (*Melampsora* spp.) And canker (*Septoria musiva*) affecting willows, as well as treatments for their control (Cerrillo 2011; Rubio et al. 2013). On the other hand, the propagation activities of *S. humboldtiana* are carried out for its reintroduction and subsequent use in riverbank stabilization (Bardi et al. 2016). Although Datri et al. (2015) mentions the importance of the presence of exotic species such as *S. fragilis* that facilitates the establishment of native species.

On the other hand, in Chile, willow cultivation is mainly focused on craft production. In the town of Chimbarongo, Region VI, the cultivation of *S. viminalis*, known as wicker, is the most important, since its characteristics make it a suitable species for the preparation of baskets and furniture (Stanton et al. 2014). The División de Normas del Instituto Nacional de Normalización, together with the Instituto Tecnológico de Chile and the Instituto Forestal de Chile (INFOR), generated an official standard (Nch2039 of 1998), where they establish the physical characteristics of the wicker rods necessary for the furniture and basket-making industry (Damann and Tapia 2015). INFOR also carries out studies that confirm the use of *Salix* as ERNC, obtaining caloric values of 4,300 Kcal / k (Pinilla and Navarrete 2011).

In Brazil, willows are used as fodder for livestock, for obtaining cellulose, as wood for sawing and for making handicrafts (Duarte and Challa 2013). The species known as "vime" (wicker) *Salix x rubens*, is widely used in crafts, being the region of Sierra Catarina, in the south of the country, the largest producer of branches, with an annual harvest of approximately 16 thousand tons. With local processing of only 1500 tons. The rest of the raw material is sold in other municipalities and states,

which represents approximately 6 million Brazilian reais per harvest (approximately 16 million US dollars). Given its economic importance, some studies focus on the analysis of the resistance and malleability of wood through the application of technology such as near infrared spectrophotometry (FT-NIR) (Nisgoski et al. 2015), while others study the suitable conditions for its cultivation (Della Mea et al. 2014). Currently, Brazil is becoming one of the main producers of pellets. It has also been proposed as an adequate species for revegetation and stabilization of river slopes (Denardi et al. 2008; Gomes et al. 2015).

Villaseñor (2016) reports 20 species of *Salix* for Mexico, being *Salix bonplandiana* the only species listed as native to the Center of Mexico. This species has played an essential role in traditional agroforestry systems such as the chinampas and calal, which developed in wetlands during pre-Columbian times (Casas et al. 2007; Moreno-Calles et al. 2013). *S. bonplandiana* y *S. humboltiana* plays an important role as a means of subsistence for rural communities for the products and services obtained from them (Pietersen 2014). From these trees, forest resources are obtained, such as wood for the construction of houses, manufacturing of furniture, elaboration of tool handles and as fuel (Sol-Sánchez et al. 2016). The fibers obtained from the willows are used to make handicrafts such as hats, mats and blowers, especially in the central region of Mexico. They are also valued for ecosystem services that provide climate regulation, erosion control and wildlife habitat (Lazos-Ruiz et al. 2016). For this reason, traditional agroforestry practices are aimed at the selection, preservation and management of willow species (Casas et al. 2007).

Leaves of *Salix babylonica* extract are used as an additive for feeding goats, lambs, cows, horses and rabbits (Salem et al. 2016). The addition of the extract in food modulates ruminal fermentation activity, improves digestibility and nutrient utilization (Elghandour et al. 2017; Valdes et al. 2015). It is also used in the treatment of gastrointestinal parasites (Salem et al. 2017), in rabbits for the control of coccidiosis (Rivero-Perez et al. 2019) and as an alternative treatment against

Staphylococcus aureus and *Listeria monocytogenes* (González-Alamilla et al. 2019). The advantage of using Sb extract is that it has no negative effects on animal health (Rivero et al. 2016)

S. humboldtiana it is a species proposed for activities used in soil and hillside restoration activities affected by erosion. Being a native species has a greater ease of adaptation to environmental conditions (Giraldo et al. 2009). In countries such as Bolivia, the genus *Salix* is recognized as one of the recommended native species for sustainable urban forestry due to its easy propagation and adaptation (Cordova 2013) they are used to reduce atmospheric pollution, moderate urban temperatures and as a refuge for biodiversity, as well as conferring benefits on the quality of life of human populations (Chino 2014; Gutiérrez 2012).

Due to their ornamental value, both tree species (*S. babylonica*, *S. bonplandiana* and *S. humboldtiana*) and shrub species (*S. taxifolia*) are used in urban projects for afforestation in parks and pedestrian paths under the perspective of landscape ecology (Galindo-Bianconi and Victoria-Urbe 2012; Lazos-Ruiz et al. 2016; Terrones et al. 2014).

Conclusions and perspectives

The use of *Salix* genus species has a common historical basis as a traditional bio-energy resource. However, while in other European countries, such as Sweden or Poland, it is used on a large scale to generate steam and electric power, in Latin America, it continues to be used as a source of energy for daily activities such as food preparation and mainly as heating (Lazos-Ruiz et al. 2016).

In Latin America the use of willows does not show a trend among countries. Argentina stands shortly after Brazil out for its *Salix* plantations established for the purpose of biomass production, whose importance is reflected in the creation of institutes dedicated to the registration of clones and improvement of species with INTA in Argentina. In both cases, the plantations have the main purpose of obtaining cellulose pulp. On the other hand, in Chile the plantations of *S. viminalis* are destined to

the elaboration of handicrafts. In no case the willow plantations are related to the phytoremediation of contaminants. However, *S. humboldtinana* is being proposed as a species suitable for use in the construction of artificial wetlands in tropical and subtropical regions (Moreno et al. 2019)

The number of species used also varies. The number of species used in Europe and Asia is much higher than in Latin America. In Latin America the arboreal species (*S. alba*, *S. amygdaloides*, *S. babylonica*, *S. matsudana*, *S. nigra*, *S. bonplandiana*, *S. humboldtiana* and *S. babylonica*) are the most used to produce biomass while in Europe the most used species is a shrub species (*S. viminalis*). *S. taxifolia* are species widely used in restoration and urban planning practices. So, most of the species used are exotic species.

There are negative opinions about the use of exotic species in ecological restoration projects. In countries like New Zealand, species of the *Salix* genus have been considered an invasive species. Their easy propagation has allowed them to expand their distribution in regions where they compete with local plants and even with native species of the same genus (Burge et al. 2017; Datri et al. 2013; Thomas et al. 2012). Because of that, species of the *Salix* genus (*S. alba*, *S. atrocinerea*, *S. babylonica*, *S. cinerea*, *S. daphnoides*; *S. exigua*, *S. fragilis*, *S. glauca*, *S. nigra*, *S. purpurea*, *S. rubens*, *S. sepulcralis*, *S. chrysocoma* and *S. triandra*) have been catalogued as invasive trees (Richardson and Rejmánek 2011) However, the dominant colonization of *Salix* is related to the intensity and frequency of perturbations like floods, more than the biological capacity of competing with native species (Datri et al. 2015). As pioneer species, willows can establish themselves in nutrient-poor soils, its presence increases the concentration of carbon and nitrogen in the soil, favoring the subsequent establishment of native species (Hu et al. 2018; Rahmonov 2016).

Latin America is an essential region with natural resources profoundly affected by contamination. However, more infrastructures for its maintenance is needed, so that it is necessary to implement new

strategies. The use of *Salix* trees for that purpose is a viable option given that it has been demonstrated to be effective in other countries, especially in rural communities because of their low installation and maintenance cost, in comparison to traditional methods. In Latin America, phytoremediation studies are scarce, so that we propose to increment participation of biotechnological research in environmental problems of this region.

As biotechnology, phytoremediation offers advantages over conventional methods in the remediation of contaminated environments. However, research is necessary to re-evaluate and validate the benefits and efficacy of phytoremediation systems for cleaning and detoxication of residual waters, particularly in countries like Mexico.

REFERENCES

- Aasamaa K, Heinsoo K, Holm B (2010) Biomass production, water use and photosynthesis of *Salix* clones grown in a wastewater purification system. *Biomass and Bioenergy* 34:897–905.
- Ali, M.B., Vajpayee, P., Tripathi, R.D., Rai, U.N., Singh, S.N., Singh, S.P. Phytoremediation of lead, nickel, and copper by *Salix acmophylla* Boiss.: Role of antioxidant enzymes and antioxidant substances. *Bulletin Environmental Contamination Toxicology*, 2003, 70, 462–469. <https://doi.org/10.1007/s00128-003-0009-1>
- Amprako, J. L.. The United Nations World Water Development Report 2015. *Future of Food: Journal on Food, Agriculture and Society*, 2016, 4(2), 64-65.
- Bernardini, A., Salvatori, E., Di Re, S., Fusaro, L., Nervo, G., Manes, F. Natural and commercial *Salix* clones differ in their ecophysiological response to Zn stress. *Photosynthetica*, 2016, 54, 56–64. <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0155-9> Blanco-Canqui H (2016) Growing dedicated energy crops on marginal lands and ecosystem services. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 80:845. <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.03.0080>
- Borowiak K, Gąsecka M, Mleczek M, Dąbrowski J, Chadzinikolau T, Magdziak Z, Goliński P, Rutkowski P, Kozubik T (2015) Photosynthetic activity in relation to chlorophylls, carbohydrates, phenolics and growth of a hybrid *Salix purpurea* × *triandra* × *viminalis* 2 at various Zn concentrations. *Acta Physiol Plant.* 37:155. <https://doi.org/10.1007/s11738-015-1904-x>
- Brereton NJ, Gonzalez E, Marleau J, Nissim WG, Labrecque M, Joly S, Pitre FE (2016) Comparative transcriptomic approaches exploring contamination stress tolerance in *Salix* sp. reveal the importance for a metaorganismal de novo assembly approach for nonmodel plants. *Plant Physiol* 171:3–24. <https://doi.org/10.1104/pp.16.00090>

5. Conclusiones

El análisis de calidad del agua muestra que de acuerdo con el parámetro DQO, las localidades San Lucas Tunco, Santa Juana 1 y Santa Juana 2 se encuentran dentro de la categoría fuertemente contaminada, mientras que las localidades Almoloya, Mexicalcingo y San Pedro Tultepec se encuentran dentro de la categoría contaminada.

En cuanto a la caracterización fenotípica, en las seis localidades solo se observaron individuos femeninos, lo cual significa que la propagación de *Salix babylonica*, ha sido mediante propagación vegetativa por intervención humana y, por lo tanto, se asume que no existe reproducción sexual. Por tanto, es probable que exista una baja diversidad genética en las poblaciones. Se encontraron diferencias significativas en las características altura, DAP y cobertura entre localidades, siendo la localidad de San Lucas Tunco la que presentó los valores más altos.

En cuanto a las características metabólicas, el análisis del contenido de clorofilas muestra diferencias entre localidades. Los valores de Chl_{a+b}/C_{x+c} obtenidos fueron bajos en las seis localidades. Estos valores son un indicador de que los árboles se encuentran bajo condiciones de estrés. Sin embargo, los árboles han sobrevivido hasta alcanzar tallas grandes lo cual es un reflejo de la tolerancia de la especie a condiciones de estrés. Podemos concluir que los árboles de las seis localidades se encuentran bajo condiciones de estrés y la tolerancia de la especie se refleja en su capacidad de alcanzar tallas grandes a pesar de estas y que los árboles de la localidad de San Lucas Tunco son los más viables para su uso en prácticas de fitorremediación, ya que son los que alcanzan tallas mayores y se encuentran en el sitio con mayores condiciones de estrés.

Este estudio nos da herramientas importantes para considerar a *Salix babylonica* como una especie apta para su uso en fitorremediación en el valle de Toluca, así como para futuros estudios. En este sentido se propone realizar análisis de DNA para determinar si los individuos son genéticamente diferentes entre las seis localidades o son clones y si las diferencias metabólicas y fenotípicas encontradas entre ellas, son el resultado de las condiciones ambientales en donde se desarrollan.

Referencias

- Abbas, Z.K., Saggi, S., Rehman, H., Al Thbiani, A., Ansari, A.A., 2017. Ecological variations and role of heat shock protein in *Artemisia judaica* L. in response to temperature regimes of Tabuk, Saudi Arabia. *Saudi J. Biol. Sci.* 24, 1268–1273. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.01.001>
- Akinbile, C.O., Ikuomola, B.T., Olanrewaju, O.O., Babalola, T.E., 2019. Assessing the efficacy of *Azolla pinnata* in four different wastewater treatment for agricultural re-use: a case history. *Sustain. Water Resour. Manag.* 5, 1009–1015. <https://doi.org/10.1007/s40899-018-0273-1>
- Ali, H., Khan, E., Sajad, M.A., 2013. Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. *Chemosphere* 91, 869–881.
- Aweng, E.R., Muhammad Irfan, A.H., Liyana, A.A., Sharifah Aisyah, S.O., 2018. Potential of phytoremediation using *Scirpus validus* for domestic waste open dumping leachate. *J. Appl. Sci. Environ. Manag.* 22, 74. <https://doi.org/10.4314/jasem.v22i1.13>
- Azcón-Bieto, J., Talón, M., 2008. *Fundamentos de Fisiología Vegetal*, 2nd ed. McGraw-Hill Interamericana, Barcelona.
- Barbosa, B., Costa, J., Boléo, S., Duarte, M.P., Fernando, A.L., 2016. Phytoremediation of Inorganic Compounds, in: Ribeiro, A.B., Mateus, E.P., Couto, N. (Eds.), *Electrokinetics Across Disciplines and Continents*. Springer International Publishing, Switzerland, pp. 373–399. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20179-5_19
- Barrera, J., Suarez, D., Luz Marina, M., 2010. Análisis de Crecimiento en Plantas. *Exp. en Fisiol. Veg.* 25–38.
- Bello, A.O., Tawabini, B.S., Khalil, A.B., Boland, C.R., Saleh, T.A., 2018. Phytoremediation of cadmium-, lead- and nickel-contaminated water by *Phragmites australis* in hydroponic systems. *Ecol. Eng.* 120, 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.05.035>
- Benedetto, A., Tognetti, J., 2016. Técnicas de análisis de crecimiento de plantas : su aplicación a cultivos intensivos. *Ria* 42, 258–282.
- Brereton, N.J.B., Gonzalez, E., Marleau, J., Nissim, W.G., Labrecque, M., Joly, S., Pitre, F.E., 2016. Comparative Transcriptomic Approaches Exploring Contamination Stress Tolerance in *Salix* sp. Reveal the Importance for a Metaorganismal de Novo Assembly Approach for Nonmodel Plants. *Plant Physiol.* 171, 3–24. <https://doi.org/10.1104/pp.16.00090>
- Cheng, L., Zhou, Q., Yu, B., 2019. Responses and roles of roots, microbes, and degrading genes in rhizosphere during phytoremediation of petroleum hydrocarbons contaminated soil. *Int. J. Phytoremediation* 21, 1161–1169. <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1612841>
- Coetzee, J.A., Hill, M.P., Ruiz-Téllez, T., Starfinger, U., Brunel, S., 2017. Monographs on invasive plants in Europe N° 2: *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms. *Bot. Lett.* 164, 303–326. <https://doi.org/10.1080/23818107.2017.1381041>
- Corseuil, H.X., Moreno, F.N., 2001. Phytoremediation potential of willow trees for aquifers contaminated with ethanol-blended gasoline. *Water Res.* 35, 3013–3017. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00588-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00588-1)

- de Souza, T.D., Borges, A.C., Braga, A.F., Veloso, R.W., Teixeira de Matos, A., 2019. Phytoremediation of arsenic-contaminated water by *Lemna Valdiviana*: An optimization study. *Chemosphere* 234, 402–408. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.06.004>
- Dellavedova, M.G., 2011. Guia Metodologica Para La Elaboracion De Una Evaluacion De Impacto Ambiental. *Guia Metodol. Para La Elabor. Una Eval. Impacto Ambient.* 2011, 1–38. <https://doi.org/8484766438>, [9788484766438](https://doi.org/9788484766438)
- Dhir, B., 2013. *Phytoremediation: Role of Aquatic Plants in Environmental Clean-Up*. Springer, New Delhi. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-1307-9>
- Díez, M.C., Moreno, F., Gantiva, E., 2017. Effects of light intensity on the morphology and CAM photosynthesis of *Vanilla planifolia* Andrews. *Rev. Fac. Nac. Agron.* 70, 8023–8033. <https://doi.org/10.15446/rfna.v70n1.61736>
- Dominguez, J.J.A., Bacosa, H.P., Chien, M.F., Inoue, C., 2019. Enhanced degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the rhizosphere of sudangrass (*Sorghum × drummondii*). *Chemosphere* 234, 789–795. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.290>
- Flores Olvera, M.H., Lindig Cisneros, R., 2005. La lista de nombres vulgares y botánicos de árboles y arbustos propicios para repoblar los bosques de la República de Fernando Altamirano y José Ramírez a más de 110 años de su publicación. *Rev.Mex.Biodiv.* 76, 11–35. <https://doi.org/10.7550/rmb.5242>
- Ghasemi, R., Mokhtari, R., 2013. Resistance to cyanide by salicylate pretreatment in *Salix babylonica* L. *Theor. Exp. Plant Physiol.* 25, 275–282.
- Hauk, S., Knoke, T., Wittkopf, S., 2014. Economic evaluation of short rotation coppice systems for energy from biomass — A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 29, 435–448. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.103>
- Hepriyadi, S.U., Kurniawati, I.D., Prihasty, W., Cordova, H., 2019. Analysis of AB nutrient film technique variation towards chlorophyll concentration of lettuce (*Lactuca sativa*) on integrated hydroponic system. *AIP Conf. Proc.* 2088, 1–5. <https://doi.org/10.1063/1.5095349>
- Hopkins, W.G., Hüner, N.P.A., 2009. *Introduction to Plant Physiology*, Fourth Ed. ed. John Wiley & Sons, Inc, United States of America. <https://doi.org/10.1192/bjp.112.483.211-a>
- Jabeen, A., Tv, K., Subrahmanyam, D., DI, L., Bhagyanarayana, G., Krishnaveni, D., 2017. Variations in Chlorophyll and Carotenoid Contents in Tungro Infected Rice Plants. *J. Res. Dev.* 2017, 1–7. <https://doi.org/10.4172/2311-3278.1000153>
- Jama-Rodzeńska, A., Bocianowski, J., Nowak, W., Cizek, D., Nowosad, K., 2016. The influence of communal sewage sludge on the content of macroelements in the stem of selected clones of willow (*Salix viminalis* L.). *Ecol. Eng.* 87, 212–217. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.11.046>
- Janssen, J., Weyens, N., Croes, S., Beckers, B., Meiresonne, L., Van Peteghem, P., Carleer, R., Vangronsveld, J., 2015. Phytoremediation of Metal Contaminated Soil Using Willow: Exploiting Plant-Associated Bacteria to Improve Biomass Production and Metal Uptake. *Int. J.*

- Phytoremediation 17, 1123–1136. <https://doi.org/10.1080/15226514.2015.1045129>
- Kurade, M.B., Xiong, J.Q., Govindwar, S.P., Roh, H.S., Saratale, G.D., Jeon, B.H., Lim, H., 2019. Uptake and biodegradation of emerging contaminant sulfamethoxazole from aqueous phase using *Ipomoea aquatica*. *Chemosphere* 225, 696–704. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.086>
- Kuzovkina, Y.A., Volk, T.A., 2009. The characterization of willow (*Salix* L.) varieties for use in ecological engineering applications: Co-ordination of structure, function and autecology. *Ecol. Eng.* 35, 1178–1189. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.03.010>
- Lazos-Ruiz, A., Moreno-Casasola, P., Guevara, S., Gallardo, C., Galante, E., 2016. Use of trees in Jamapa, traditions in a deforested area. *Madera y Bosques* 22, 17–36.
- Li, Y., Liu, C., Zhang, J., Yang, H., Xu, L., Wang, Q., Sack, L., Wu, X., Hou, J., He, N., 2018. Variation in leaf chlorophyll concentration from tropical to cold-temperate forests: Association with gross primary productivity. *Ecol. Indic.* 85, 383–389. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.10.025>
- Lichtenthaler, H.K., 1987. Chlorophylls and Carotenoids: Pigments of Photosynthetic Biomembranes. *Methods Enzymol.* 148, 350–382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
- Marmioli, M., Pietrini, F., Maestri, E., Zacchini, M., Marmioli, N., Massacci, A., 2011. Growth, physiological and molecular traits in Salicaceae trees investigated for phytoremediation of heavy metals and organics. *Tree Physiol.* 31, 1319–1334. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpr090>
- McBride, M.B., Martinez, C.E., Kim, B., 2016. Zn, Cd, S and trace metal bioaccumulation in willow (*Salix* spp.) cultivars grown hydroponically. *Int. J. Phytoremediation* 18, 1178–1186. <https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1189401>
- Mengistu, B.B., Unbushe, D., Abebe, E., 2017. Invasion of Water Hyacinth (&i&tEichhornia crassipes&tE) Is Associated with Decline in Macrophyte Biodiversity in an Ethiopian Rift-Valley Lake—Abaya. *Open J. Ecol.* 07, 667–681. <https://doi.org/10.4236/oje.2017.713046>
- Mleczek, M., Rutkowski, P., Rissmann, I., Kaczmarek, Z., Golinski, P., Szentner, K., Strazyńska, K., Stachowiak, A., 2010. Biomass productivity and phytoremediation potential of *Salix alba* and *Salix viminalis*. *Biomass and Bioenergy* 34, 1410–1418. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.04.012>
- Nirmal Kumar, J.I., Soni, H., Kumar, R.N., Bhatt, I., 2008. Macrophytes in phytoremediation of heavy metal contaminated water and sediments in urban inland ponds. *Turkish J. Fish. Aquat. Sci.* 8, 193–200.
- Novita, V.Z., Moersidik, S., Priadi, C.R., 2019. Phytoremediation Potential of *Pistia stratiotes* to Reduce High Concentration of Copper (Cu) in Acid Mine drainage, in: *Earth and Environmental Science*. pp. 0–7. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/355/1/012063>
- Orwa C, M.A., Kindt, R., Jamnadass, R., Simons, A., 2009. *Salix babylonica*, in: *Agroforestry*

Database: A Tree Reference and Selection Guide Version 4.0. pp. 1–5.

- Pathak, R., 2016. Arsenic Attenuation through Phytochemistry XIV, 131–141.
- Pino, N.J., Múnera, L.M., Peñuela, G.A., 2019. Phytoremediation of soil contaminated with PCBs using different plants and their associated microbial communities. *Int. J. Phytoremediation* 21, 316–324. <https://doi.org/10.1080/15226514.2018.1524832>
- Purdy, J.J., Smart, L.B., 2008. Hydroponic screening of shrub willow (*Salix* spp.) for arsenic tolerance and uptake. *Int. J. Phytoremediation* 10, 515–528. <https://doi.org/10.1080/15226510802115000>
- Queiroz, R. de C.S. de, Lôbo, I.P., Ribeiro, V. de S., Rodrigues, L.B., Almeida Neto, J.A. de, 2019. Assessment of autochthonous aquatic macrophytes with phytoremediation potential for dairy wastewater treatment in floating constructed wetlands. *Int. J. Phytoremediation* 0, 1–11. <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1686603>
- Rahman, M. Azizur, Reichman, S.M., De Filippis, L., Sany, S.B.T., Hasegawa, H., 2015. Phytoremediation of toxic metals in soils and wetlands: Concepts and applications, in: Hasegawa, H., Rahman, I.M., Rahman, Mohammad Azizur (Eds.), *Environmental Remediation Technologies for Metal-Contaminated Soils*. Springer, pp. 161–195. https://doi.org/10.1007/978-4-431-55759-3_8
- Ramasamy, E.V., 2016. Decontamination of wastewater with phytoremediation. *South Indian J. Biol. Sci.* 2, 84–87.
- Rezania, S., Taib, S.M., Md Din, M.F., Dahalan, F.A., Kamyab, H., 2016. Comprehensive review on phytotechnology: Heavy metals removal by diverse aquatic plants species from wastewater. *J. Hazard. Mater.* 318, 587–599. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.07.053>
- Romero-Aguilar, M., Colín-Cruz, A., Sánchez-Salinas, E., Ortiz-Hernández, M.L., 2009. Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: Evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 25, 157–167.
- Sánchez-Sánchez, A., Tejocote-Pérez, M., Fuentes-Rivas, R.M., Linares-Hernández, I., Martínez-Miranda, V., Fonseca-Montes de Oca, R.M.G., 2018. Treatment of a Textile Effluent by Electrochemical Oxidation and Coupled System Electrooxidation– *Salix babylonica*. *Int. J. Photoenergy* 2018, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2018/3147923>
- Sánchez, V., López-Bellido, F.J., Cañizares, P., Rodríguez, L., 2017. Assessing the phytoremediation potential of crop and grass plants for atrazine-spiked soils. *Chemosphere* 185, 119–126. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.013>
- Santos, M., Segura, M., Nústes, C., 2010. Growth analysis and source-sink relationships of four potato cultivars (*Solanum tuberosum* L.) in the Zipaquira Town (Cundinamarca, Colombia). *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín* 63, 5253–5266.
- Shi, X., Leng, H., Hu, Y., Liu, Y., Duan, H., Sun, H., Chen, Y., 2012. Removal of 2,4-dichlorophenol in hydroponic solution by four *Salix matsudana* clones. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 86, 125–131. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.09.002>

- Shi, X., Sun, H., Pan, H., Chen, Y., Jiang, Z., Liu, J., Wang, S., 2016. Growth and efficiency of nutrient removal by *Salix jiangsuensis* J172 for phytoremediation of urban wastewater. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 23, 2715–2723. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5508-1>
- Shores, A.R., Hethcock, B., Laituri, M., 2018. Phytoremediation of BTEX and Naphthalene from produced-water spill sites using Poaceae. *Int. J. Phytoremediation* 20, 823–830. <https://doi.org/10.1080/15226514.2018.1438352>
- Silva, A.M., 2010. Characterization of the potential use of *Salix nigra* and *Populus balsamifera* for the phytoremediation of 1,4-dioxane. Queen's University Kingston, Kingston, Ontario, Canada.
- Sun, Y.Y., Xu, H.X., Li, J.H., Shi, X.Q., Wu, J.C., Ji, R., Guo, H.Y., 2016. Phytoremediation of soils contaminated with phenanthrene and cadmium by growing willow (*Salix* × *Aureo-Pendula* CL 'j1011'). *Int. J. Phytoremediation* 18, 150–156. <https://doi.org/10.1080/15226514.2015.1073668>
- Taiz, L., Zeiger, E., 2002. *Plant Physiology*. 3rd edn., Sinauer Associates, Inc. Publishers, Sunderland, MA, USA. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg079>
- Tangahu, B.V., Sheikh Abdullah, S.R., Basri, H., Idris, M., Anuar, N., Mukhlisin, M., 2011. A review on heavy metals (As, Pb, and Hg) uptake by plants through phytoremediation. *Int. J. Chem. Eng.* 2011. <https://doi.org/10.1155/2011/939161>
- Tejeda, A., Torres-Bojorges, Á.X., Zurita, F., 2017. Carbamazepine removal in three pilot-scale hybrid wetlands planted with ornamental species. *Ecol. Eng.* 98, 410–417. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.04.012>
- Thomas, E., Cerrillo, T., 2014. Evaluación preliminar de nuevos clones de sauce en la región Norpatagónica, Congreso Internacional de Salicáceas en Argentina.
- Ting, W.H.T., Tan, I.A.W., Salleh, S.F., Wahab, N.A., 2018. Application of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for phytoremediation of ammoniacal nitrogen: A review. *J. Water Process Eng.* 22, 239–249. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.02.011>
- Truu, J., Truu, M., Espenberg, M., Nõlvak, H., Juhanson, J., 2015. Phytoremediation And Plant-Assisted Bioremediation In Soil And Treatment Wetlands: A Review. *Open Biotechnol. J.* 9, 85–92. <https://doi.org/10.2174/1874070720150430E009>
- Vannucchi, F., Francini, A., Pierattini, E.C., Raffaelli, A., Sebastiani, L., 2019. *Populus alba* dioctyl phthalate uptake from contaminated water. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 26, 25564–25572. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05829-0>
- Victor, K.K., Séka, Y., Norbert, K.K., Sanogo, T.A., Celestin, A.B., 2016. Phytoremediation of wastewater toxicity using water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and water lettuce (*Pistia stratiotes*). *Int. J. Phytoremediation* 18, 949–955. <https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1183567>
- Wang, L., Ji, B., Hu, Y., Liu, R., Sun, W., 2017. A review on in situ phytoremediation of mine tailings. *Chemosphere* 184, 594–600. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.025>

- Wang, T., Hu, J., Liu, C., Yu, D., 2017. Soil type can determine invasion success of *Eichhornia crassipes*. *Hydrobiologia* 788, 281–291. <https://doi.org/10.1007/s10750-016-3003-4>
- Yang, W., Wu, F., Ding, Z., Zhang, X., Zhao, F., Wang, Y., Yang, X., 2018. Cadmium Accumulation and Tolerance in Seven Ornamental Willow Genotypes. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 101, 644–650. <https://doi.org/10.1007/s00128-018-2434-1>
- Yu, X.Z., Gu, J.D., 2008. The role of EDTA in phytoextraction of hexavalent and trivalent chromium by two willow trees. *Ecotoxicology* 17, 143–152. <https://doi.org/10.1007/s10646-007-0177-6>
- Yu, X.Z., Gu, J.D., 2007. Accumulation and distribution of trivalent chromium and effects on hybrid willow (*Salix matsudana* Koidz x *alba* L.) metabolism. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 52, 503–511. <https://doi.org/10.1007/s00244-006-0155-7>
- Yu, X.Z., Gu, J.D., 2006. Uptake, metabolism, and toxicity of methyl tert-butyl ether (MTBE) in weeping willows. *J. Hazard. Mater.* 137, 1417–1423. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.04.024>
- Yu, X.Z., Gu, J.D., Li, L., 2008. Assimilation and physiological effects of ferrocyanide on weeping willows. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 71, 609–615. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2008.05.007>
- Yu, X.Z., Zhou, P.H., Yang, Y.M., 2006. The potential for phytoremediation of iron cyanide complex by willows. *Ecotoxicology* 15, 461–467. <https://doi.org/10.1007/s10646-006-0081-5>
- Zheng, Y., Wang, X.C., Dzakpasu, M., Ge, Y., Zhao, Y., Xiong, J., 2016. Performance of a pilot demonstration-scale hybrid constructed wetland system for on-site treatment of polluted urban river water in Northwestern China. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 23, 447–454. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5207-y>
- Zhivotovsky, O.P., Kuzovkina, Y.A., Schulthess, C.P., Morris, T., Pettinelli, D., Ge, M., 2011. Hydroponic screening of willows (*SALIX* L.) for lead tolerance and accumulation. *Int. J. Phytoremediation* 13, 75–94. <https://doi.org/10.1080/15226511003671361>

Anexos

Santa Juana 1



Figura 7. Imagen santa Juana 1 en época de estiaje

Santa Juana 2



Figura 8. Santa Juana 2 durante época de estiaje

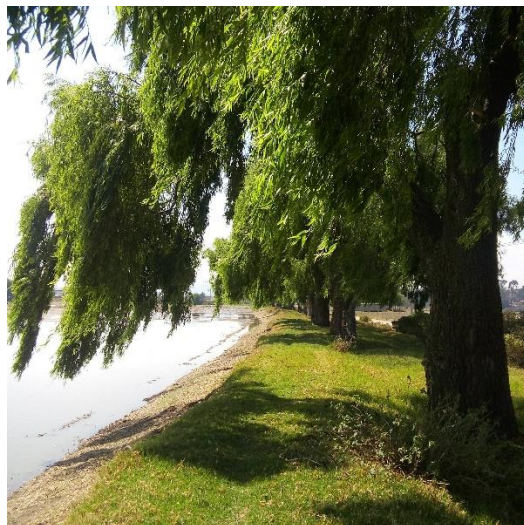


Figura 9. Santa Juana 2 durante la época de estiaje

Almoloya

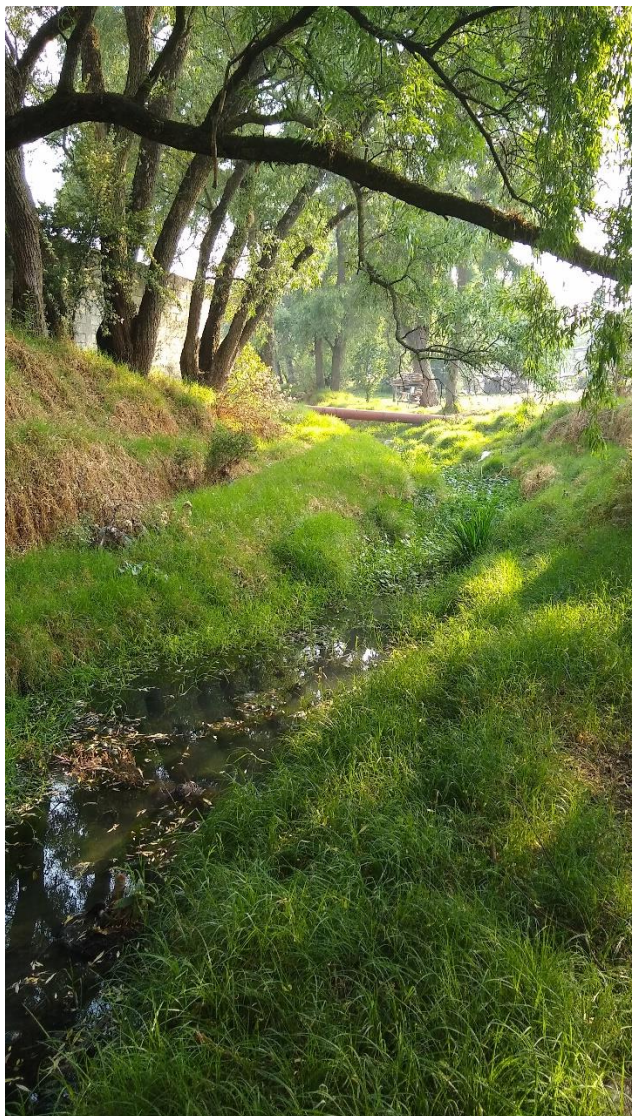


Figura 10. Almoloya

San Pedro Tultepec

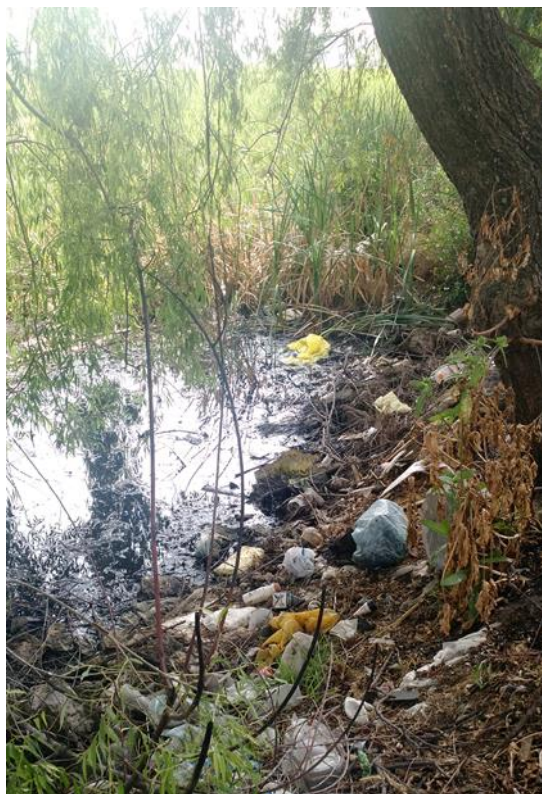


Figura 11. Contaminación por basura en San Pedro Tultepec

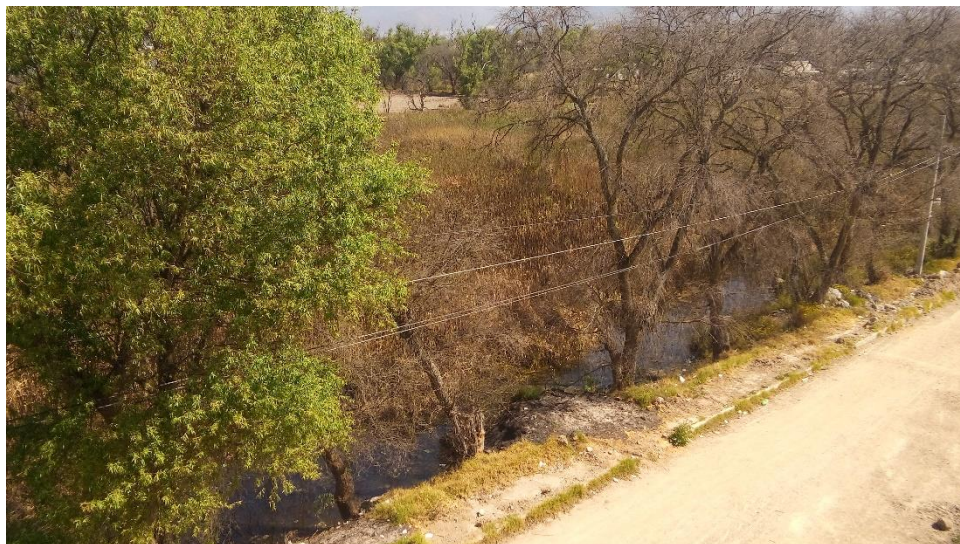


Figura 12. San Pedro Tultepec

San Lucas Tunco



Figura 13. Contaminación por basura en San Lucas Tunco

Mexicalcingo



Figura 14. San Lucas Tunco



Figura 15. Mexicalcingo