

Fitorremediación de suelos contaminados por cadmio y plomo mediante plantas florales plantadas en terreno agrícola en ensayos con medios salinos

Erick Ferrufino-Guardia^{1,*}, Christian Estívariz¹, M. Micaela Guamán¹

¹Centro de Biotecnología, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

*nanferru@hotmail.com

Resumen

Las especies florales *Calendula officinalis*, *Plumbago auriculata* y *Chrysanthemum morifolium* fueron estudiadas por su potencial aplicación en la fitorremediación de suelos contaminados con cadmio y plomo. El estudio fue llevado a cabo *in situ* durante 12 semanas y se dividió en 2 etapas de muestreo, añadiendo en la segunda etapa soluciones salinas a las plantas. Los resultados obtenidos demostraron que estas especies florales son hiperacumuladoras de cadmio y plomo, y poseen la capacidad de extraer y tolerar en sus tejidos elevadas concentraciones de estos metales sin sufrir alteraciones en su desarrollo. Además, en el caso de las especies *Calendula officinalis* y *Plumbago auriculata* el medio salino y el tiempo de crecimiento fueron factores favorables para el incremento en la acumulación de dichos metales pesados. La investigación también reveló de qué forma se distribuyen estos metales pesados en las distintas partes de las plantas, permitiendo analizar la capacidad de translocación que poseen.

Palabras clave: Especies florales, Factor de bioconcentración, Fitorremediación, Metales pesados, *In situ*.

Abstract

The floral species *Calendula officinalis*, *Plumbago auriculata* and *Chrysanthemum morifolium* were studied for their potential application in the phytoremediation of soils contaminated with cadmium and lead. The study was carried out *in situ* for 12 weeks and it was divided into 2 sampling stages, adding saline solutions to the plants in the second stage. The results obtained showed that these floral species are hyperaccumulators of cadmium and lead, and have the ability to extract and tolerate high concentrations of these metals in their tissues without suffering alterations in their development. Further, in the case of the species *Calendula officinalis* and *Plumbago auriculata*, the saline medium and the growth time were favorable factors for the increase in the accumulation of the mentioned heavy metals. The research also revealed how these heavy metals are distributed in the different parts of the plants, making it possible to analyze their translocation capacity.

Key words: Floral species, Bioconcentration factor, Phytoremediation, Heavy metals.

1. Introducción

En las décadas recientes la contaminación del suelo con distintos metales pesados provenientes de las actividades minera, petrolera, metalurgia, industrias de fertilizantes o la incineración de residuos se ha ido incrementando enormemente a nivel mundial. En el caso de Bolivia, una de las principales causas de contaminación con metales pesados es la minería artesanal (Chamba-Eras *et al.*, 2022). Esto representa una grave amenaza a la seguridad de los alimentos y a los ecosistemas ambientales en todo el mundo,

además de provocar la alteración de la diversidad de poblaciones biológicas en los suelos, lo que resulta en problemas con el crecimiento de las plantas y su supervivencia (Mani *et al.*, 2020). Asimismo, los cultivos que se desarrollen en estos suelos pueden contener niveles altamente alarmantes de metales pesados que pueden ser transferidos a la cadena trófica animal y humana, llegando a causar diversas y graves enfermedades en las personas (Aransiola *et al.*, 2019).

Debido a este problema nacieron técnicas mecánicas y químicas para enmendar los suelos. Sin embargo,

estas técnicas son demasiado costosas y en ocasiones generan impactos adicionales sobre los ecosistemas. Por ello surge la fitorremediación como una alternativa más verde y sustentable. La fitorremediación es el proceso de utilizar plantas que tengan la capacidad de extraer, acumular y/o degradar los contaminantes en sus tejidos, sin sufrir alteraciones en su desarrollo. Esta tecnología posee los beneficios de ser menos costosa, aplicarse *in situ*, no requiere remoción de tierra con maquinaria, se aplica en grandes superficies de suelo y tiene una buena aceptación pública debido a la atractiva percepción de las plantas o flores (Aransiola *et al.*, 2019).

Existen muchas especies que han tenido éxito en la absorción de metales pesados como arsénico, cadmio, cromo y plomo, desde plantas herbáceas hasta plantas florales, incrementando el interés sobre estas especies en las últimas décadas. Tal es el caso de las especies *Aster novibelgii*, *Dahlia sambucifolia*, *Calendula officinalis* y *Chrysanthemum indicum*, las cuales fueron estudiadas para determinar su capacidad de fitorremediación frente a suelos contaminados con cromo (Ramana *et al.*, 2013). Así también, las especies florales *Althaea rosea* e *Impatiens Balsamina* fueron estudiadas, demostrado una gran capacidad de acumulación de metales pesados como cadmio y plomo (Liu *et al.*, 2008). Las plantas florales hiperacumuladoras tienen un beneficio adicional al ser utilizadas en la absorción de metales pesados, y es que una vez que hayan extraído los metales pesados en sus tejidos, pueden ser cosechadas y comercializadas, y de esta forma establecerse como una actividad más sustentable financieramente.

Esta investigación, tuvo como principal objetivo la evaluación del desempeño de tres especies florales nativas hiperacumuladoras de metales pesados (*Calendula officinalis*, *Plumbago auriculata* y *Chrysanthemum morifolium*) en la absorción y descontaminación *in situ* de suelos con cadmio y plomo. Considerando un estudio *in situ* se puede examinar mejor la eficacia de la fitorremediación, ya que se simulan las condiciones reales y los resultados de los ensayos realizados a esta escala son más ventajosos en aplicaciones prácticas de métodos de fitorremediación (Aransiola *et al.*, 2019).

2. Métodos y Materiales

Preparación del suelo

Se prepararon 9 parcelas en el terreno agrícola proporcionado por la Facultad de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y Forestales de la UMSS. Cada parcela tenía una superficie de 3 metros en cada lado. En cada una se realizaron 3 surcos con una separación de 50 cm entre surcos y parcelas.

En cada surco de cada parcela se plantaron 3 plantas de la misma especie, para tener 9 plantas en cada parcela, haciendo un total de 27 plantas por especie. Se definió una separación de 20 cm entre plantas de cada surco.

Contaminación del suelo

El suelo fue contaminado con sales de cadmio y plomo del agua proveniente principalmente de la refinería de YPFB “Gualberto Villarroel” y en menor medida de la represa de La Angostura, esta agua tenía una concentración promedio 9,47 ppm de cadmio y 585,69 ppm de plomo. Todas las parcelas eran regadas con grandes cantidades de estas aguas, debido principalmente a que el suelo era muy seco.

Preparación de soluciones salinas

Se prepararon dos soluciones de cloruro de sodio (NaCl) de concentraciones diferentes, una solución de 100 ppm y otra de 300 ppm. Asumiendo que cada planta abarcaba 4 kg de tierra se determinó que para la solución de 100 ppm se requería 8 g de NaCl por litro y para la solución de 300 ppm se requería 24 g de NaCl por litro.

Tratamiento de las plantas

Durante 12 semanas las 9 parcelas fueron regadas con agua contaminada con cadmio y plomo. Posteriormente, a partir de la séptima semana se agregó también soluciones salinas de cloruro de sodio a dos de las parcelas de cada especie. El tratamiento con agua contaminada con cadmio y plomo se realizó dos veces por semana a todas las parcelas, mientras que el tratamiento con soluciones salinas se realizó una sola vez por semana. Una de las parcelas de cada especie fue regada con solución salina de 100 ppm, y la otra fue regada con solución salina de 300 ppm. El tratamiento con soluciones salinas consistía en inyectar 50 mL de la solución de cloruro de sodio

directamente hacia la raíz a una distancia de 5 a 10 cm del tallo.

Toma de muestras de tierra, plantas y agua de riego

Durante la etapa experimental se realizaron 2 muestreos. El primer muestreo se llevó a cabo 6 semanas después de haber realizado la plantación, donde se extrajeron 2 plantas de cada especie por parcela con un aproximado de 1 kg de su tierra, haciéndose un total de 18 plantas. El segundo muestreo se llevó a cabo 12 semanas después de haber realizado la plantación, se extrajeron 3 plantas de cada especie por parcela, con aproximadamente 0,5 kg de su respectiva tierra para las dos primeras plantas y 1 kg correspondiente a la tercera planta.

Al extraer la tierra de cada planta, se consideró un perímetro de 10 cm alrededor de la planta, esta cantidad de tierra fue homogeneizada y se retiró alrededor de 1 kg por cada planta. Además, cada planta fue cortada y dividida en raíz, tallo, hojas y flor, este procedimiento se realizó con todas las plantas del primer muestreo, y con la tercera muestra de cada parcela del segundo muestreo.

Determinación de la concentración de metales pesados y el factor de bioconcentración (BC)

Todas estas muestras se expusieron al sol durante 3 a 4 días para su secado para luego obtener su peso en seco. Tras el secado, se procedió a moler todas las muestras de las plantas con un molador manual y luego se realizó la digestión abierta con soluciones de ácido nítrico para las plantas y una mezcla digestora de ácido nítrico con ácido perclórico para las muestras de tierra, esta etapa se llevó a temperaturas entre 200°C y 300°C.

Las muestras digeridas fueron filtradas y diluidas para finalmente determinar la concentración de plomo y cadmio mediante el uso del espectrofotómetro de absorción atómica (PerkinElmer. AAnalyst 200).

Las muestras del agua de riego fueron tomadas en 4 ocasiones: al inicio de la plantación, 2 semanas después, en la fase de primer muestreo y al haber transcurrido 3 meses desde la plantación inicial. En la determinación de los metales pesados de este tipo de muestras se utilizó la misma técnica de la digestión ácida seguida de la toma de lectura con el espectrofotómetro.

Con los datos de las lecturas obtenidas para cada especie se determinó el factor de bioconcentración (BC), que es la relación de la concentración del metal en la raíz ($C_{\text{metal en raíz}}$) respecto de la concentración del metal en la tierra después de que las plantas absorbieron los metales ($C_{\text{metal en tierra}}$):

$$BC = \frac{C_{\text{metal en raíz}}}{C_{\text{metal en tierra}}}$$

Este factor es un importante indicador que nos permite identificar si una especie vegetal es o no hiperacumuladora de un determinado metal pesado y es uno de los indicadores más utilizados para la determinación de especies vegetales que son hiperacumuladoras de metales pesados (Mani *et al.*, 2020). Una especie vegetal es hiperacumuladora si su BC es mayor a 1. Los resultados de este factor son explicados en el siguiente subtítulo y pueden ser apreciados en la Figura 1 y Figura 2.

3. Resultados y Discusión

Es importante mencionar que las 3 especies florales lograron extraer el cadmio y plomo que se encontraban presentes en la tierra de las parcelas donde se plantaron y en el agua con la que se regó. En la Figura 1 y Figura 2 podemos evidenciar que, en el caso del cadmio, los factores de bioconcentración de las 3 especies se sitúan entre 1,6 y 1,9, y para el primer muestreo el factor de bioconcentración del plomo es aún mayor, estando entre 3 y 4, lo cual nos indica que las plantas llegaron a acumular mayores concentraciones de plomo que de cadmio, esto podría deberse a que la concentración de plomo en el agua de riego era superior que la del cadmio. Estos resultados demuestran que estas especies florales efectivamente son hiperacumuladoras de cadmio y plomo en condiciones *in situ*.

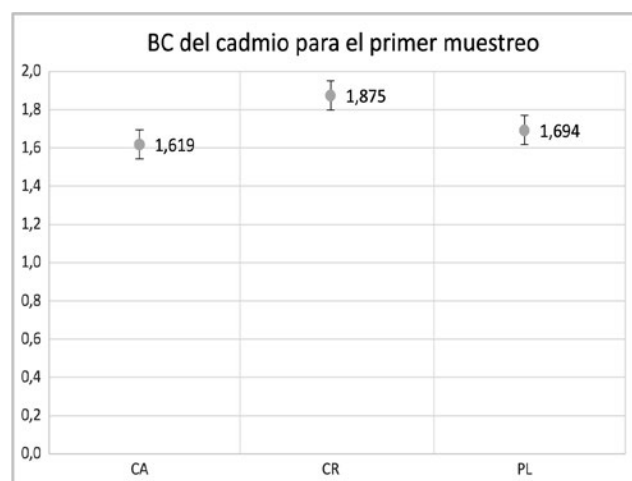


Figura 1. Factor de bioconcentración (BC) del cadmio para las especies florales *Calendula officinalis* (CA), *Chrysanthemum morifolium* (CR) y *Plumbago auriculata* (PL), pertenecientes al primer muestreo.

También podemos observar que el *Chrysanthemum morifolium* es el mejor absorbente de cadmio, seguido por el *Plumbago auriculata*, y para el plomo, la especie con mejor desempeño de absorción es la *Calendula officinalis* seguido por el *Plumbago auriculata*. Realizando una comparación entre los factores de bioconcentración de las especies de este estudio y los de especies florales hiperacumuladoras de otras investigaciones se encuentra lo siguiente:

En un estudio reciente de las especies *Erato polymnioides* y *Miconia sp.* los investigadores obtuvieron niveles superiores de absorción de cadmio (Chamba-Eras *et al.*, 2022), aproximadamente 4 veces más que las especies *Calendula officinalis*, *Plumbago auriculata* y *Chrysanthemum morifolium*. Sin embargo, las especies del presente estudio alcanzaron factores de bioconcentración de plomo mucho más elevados que de las especies *Erato polymnioides* y *Miconia sp.*, entre a 4 a 6 veces superior. Vale la pena mencionar que las concentraciones de cadmio y plomo de los suelos contaminados del estudio de Chamba-Eras *et al.* (2022) eran muy parecidas a las del suelo de la Facultad de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y Forestales de la UMSS.

En otra investigación realizada con las especies *Impatiens Balsamina* y *Althaea rosea* se encontró que estas especies logran hiperacumular mayores cantidades de cadmio en sus brotes en tratamientos con niveles de cadmio similares a los del presente trabajo (Liu *et al.*, 2008). De la misma manera, analizando los

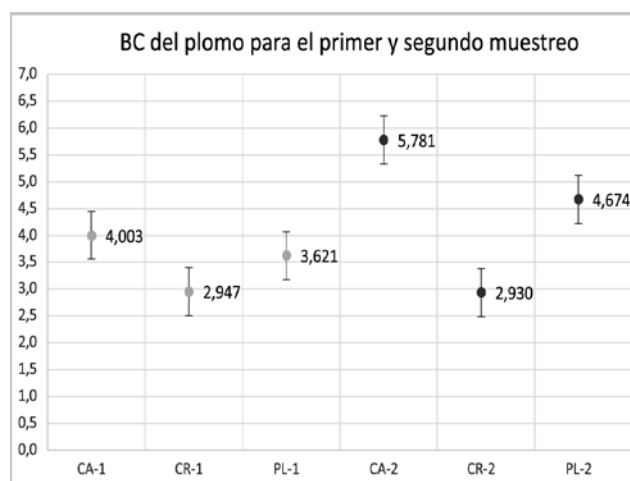


Figura 2. Factor de bioconcentración (BC) del plomo para las especies florales *Calendula officinalis* (CA), *Chrysanthemum morifolium* (CR) y *Plumbago auriculata* (PL), perteneciente al primer muestreo (puntos azules) y al segundo muestreo (puntos rojos).

niveles de acumulación de la especie floral *Melastoma malabathricum L.* obtenidos en una investigación realizada en Malasia (Norleela Selamat *et al.*, 2014), se encontró que esta especie logró alcanzar factores de bioconcentración muy elevados a comparación de los obtenidos para las especies *Calendula officinalis*, *Plumbago auriculata* y *Chrysanthemum morifolium* en tratamientos con concentraciones menores de plomo a las del presente trabajo, por lo que esta especie es claramente superior en cuanto a la extracción de plomo.

En la Figura 2 podemos apreciar que, con el paso del tiempo y el efecto de las soluciones salinas aplicadas, los factores de bioconcentración del plomo de la *Calendula officinalis* y del *Plumbago auriculata* se incrementaron desde 4 hasta 5,78 y desde 3,62 hasta 4,67 respectivamente, en el caso del *Chrysanthemum morifolium* el factor de bioconcentración se mantuvo. Por lo cual, es probable que la aplicación del cloruro de sodio y a mayor tiempo de desarrollo de las plantas, se logre una mayor extracción de plomo encontrado en el suelo contaminado, especialmente con las especies *Calendula officinalis* y *Plumbago auriculata*. A continuación, se presentan las gráficas donde se puede observar la distribución del cadmio y plomo en las distintas partes de cada planta.

En la Figura 3 y Figura 4 se puede observar que no existe una clara tendencia de la forma en la que las especies florales distribuyen al cadmio y plomo en sus distintas partes, por lo cual se requerirían futuros

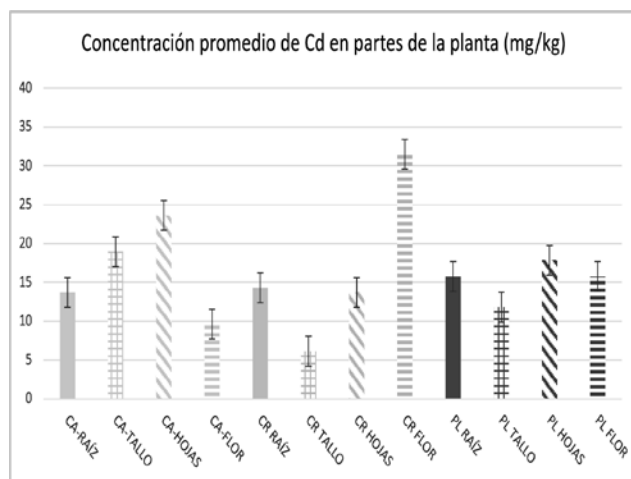


Figura 3. Concentración promedio de cadmio (mg/kg) en distintas partes de las especies florales *Calendula officinalis* (CA), *Chrysanthemum morifolium* (CR) y *Plumbago auriculata* (PL).

estudios con mayor tiempo de desarrollo para las plantas con el objetivo de encontrar una tendencia y evaluar la capacidad de translocación de cada especie, es decir, qué tan bien trasladan al metal pesado desde sus raíces hacia sus demás partes como los tallos u hojas. Sin embargo, comparando la distribución del cadmio y plomo en la especie *Calendula officinalis* con la distribución hallada por Liu *et al.*, (2008), se encuentra que de igual forma el plomo tiende a concentrarse más en las raíces, mientras que existe una diferencia en la distribución del cadmio, ya que, en esta investigación, el cadmio se acumula sobre todo en las raíces y no así en los tallos como se muestra en la Figura 3.

Los resultados obtenidos de los factores de bioconcentración de plomo para la *Calendula officinalis* fueron superiores a los obtenidos en el estudio realizado por Mani *et al.* (2020), una causa probable podría ser que en dicho estudio la concentración inicial en el suelo contaminado era 20 veces menor que la concentración de plomo en los suelos donde se plantaron las plantas de *Calendula officinalis* de nuestra investigación.

Realizando el mismo análisis para el *Chrysanthemum morifolium*, utilizando como referencia una investigación realizada en conjunto por investigadores de China e Irlanda (Zhang *et al.*, 2020) sobre esta especie, el factor de bioconcentración del cadmio encontrado en dicho estudio es algo superior al encontrado en el presente trabajo, por lo cual los resultados que se obtuvieron serían bastante parecidos

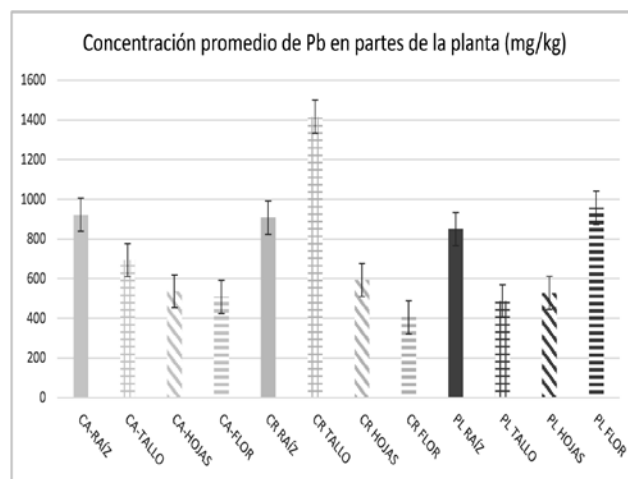


Figura 4. Concentración promedio de plomo (mg/kg) en distintas partes de las especies florales *Calendula officinalis* (CA), *Chrysanthemum morifolium* (CR) y *Plumbago auriculata* (PL).

entre ambos estudios. Comparando el factor de bioconcentración del plomo, se encuentra que el factor de bioconcentración obtenido en la presente investigación es el triple del encontrado en el estudio realizado por Zhang *et al.* (2020).

Para la comparación de los resultados obtenidos del *Plumbago auriculata* se revisó un estudio realizado en Polonia (Tokarz *et al.*, 2020), en dicho estudio se presentan las concentraciones de plomo en las raíces y tallos, donde se observa que el plomo se deposita más que todo en las raíces, hecho que coincide con los resultados que se obtuvieron, lo que indicaría que el *Plumbago auriculata* no tiene mucha capacidad de transferir el plomo de sus raíces hacia sus tallos.

4. Conclusiones

Se documentó el desempeño de estas plantas en el medio contaminado durante 12 semanas, donde la mayoría de las plantas se desarrollaron de forma normal, incluso en muchos casos, las plantas de las especies *Plumbago auriculata* y *Chrysanthemum morifolium* lograron obtener buenas cantidades de biomasa.

El factor de bioconcentración fue de bastante utilidad para determinar si las especies vegetales estudiadas son hiperacumuladoras o no de cadmio y plomo en condiciones *in situ*, ya que solamente se requirió encontrar la concentración de los metales pesados en las raíces o tallos de cada planta y en el suelo donde se realizó el estudio de campo. Asimismo, otro indicador

sugerido para ampliar el estudio de estas especies hiperacumuladoras es el factor de translocación, el cual relaciona la concentración del metal pesado en el tallo de la planta respecto a su raíz.

El cloruro de sodio es beneficioso para la extracción de plomo en las especies de *Chrysanthemum morifolium* y *Plumbago auriculata*, pero perjudicial para la *Calendula officinalis*. Además, el medio salino aplicado no impidió que la densidad foliar de las plantas de *Chrysanthemum morifolium* y *Plumbago auriculata* continúe desarrollándose de manera normal, por lo cual, estas dos especies tendrían éxito en la fitorremediación de suelos salinos contaminados con plomo.

Del presente estudio se concluye que las especies florales *Calendula officinalis* y *Plumbago auriculata* son las mejores especies para fitoextraer plomo y para la bioacumulación de cadmio son las especies *Chrysanthemum morifolium* y *Plumbago auriculata*.

5. Referencias bibliográficas

- Aransiola, S., Ijah, J., Abioye, O., & Bala, J. (2019). Microbial-aided phytoremediation of heavy metals contaminated soil: a review. *European Journal of Biological Research*, 9(2), 104-125.
- Chamba-Eras, I., Griffith, D., Kalinhoff, C., Ramírez, J., & Gázquez, M. (2022). Native Hyperaccumulator Plants with Differential Phytoremediation Potential in a Artisanal Gold Mine of the Ecuadorian Amazon. *Plants*, 11, 1186.
- Liu, J., Zhou, Q., Sun, T., Ma, L., & Wang, S. (2008). Growth responses of three ornamental plants to Cd and Cd-Pb stress and their metal accumulation characteristics. *Journal of Hazardous Materials*, 151, 261-267.
- Mani, D., Sahu, V., & Singh, B. (2020). Bioaccumulation of As and Pb in pot marigold grown in sewage irrigated soils of Prayagraj, Uttar Pradesh, India. *Plant Archives*, 20(2), 5100-5106.
- Norleela Selemat, S., Rozaimah Sheikh Abdullah, S., & Idris, M. (2014). Phytoremediation of lead (Pb) and Arsenic (As) by *Melastoma malabathricum* L. from Contaminated Soil in Separate Exposure. *International Journal of Phytoremediation*, 16, 684-703.
- Ramana, S., Biswas, A., & Singh, A. (2013). Phytoremediation ability of some floricultural plant species. *Indian Journal of Plant Physiology*, 18(2), 187-190.
- Tokarz, K., Makowski, W., Tokarz, B., Hanula, M., Sitek, E., Muszynska, E., Jedrzejczyk, R., Banasiuk, R., Chajec, L., & Mazur, S. (2020). Can Ceylon Leadwort (*Plumbago zeylanica* L.) Acclimate to Lead Toxicity?—Studies of Photosynthetic Apparatus Efficiency. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(5), 1866.
- Zhang, C., Qian, J., Zhang, W., Lei, Y., Wang, S., Liu, J., & Zhang, C. (2020). Study on the remediation effect and environmental benefits of ornamental plants on heavy metal soil: a case study of Kaifeng City Chrysanthemum. *Environmental Chemistry*, (7), 1883-1893.