Estudio del desarrollo radicular en biorrollos para la reintroducción de plantas acuáticas en arroyos urbanos.

Julieta Pellettieri1 y Lautaro Monteys2

1. Lic. Ciencias Biológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. Mail: julipellettieri@gmail.com

(2) Lic. Ciencias de la Computación, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires

# Resumen:

En la actualidad el mal manejo de los arroyos urbanos ha causado su deterioro, afectando negativamente la calidad de vida de las poblaciones aledañas. Afortunadamente en los últimos años se desarrollaron nuevas técnicas para la restauración de estos espacios. Entre ellas se encuentra la utilización de biorrollos para la reintroducción de macrófitas nativas. Sin embargo, estos biorrollos cuando entran en contacto con el agua liberan un lixiviado. Con el objetivo de estudiar el efecto del lixiviado sobre el desarrollo de las plantas y evaluar qué especie es mejor candidata para integrar con este método, se prepararon 66 biorrollos, la mitad previamente tratados para reducir los lixiviados. A cada biorrollo se le asignó una planta (Junco, Totora o Pehuajó) y, tras 93 días, se evaluó el desarrollo radicular de las mismas. Todas las especies mostraron una tasa de enraizamiento similar ( ~77%) independientemente del tratamiento. Pehuajó sin el tratamiento de remojo previo se destacó por presentar raíces significativamente más largas con una mediana de 23 cm, característica clave para maximizar el éxito de las tareas de restauración.

**Palabras clave:** lixiviado, macrófitas acuáticas, restauración, fitorremediación.

# Introducción:

En la actualidad los arroyos urbanos se encuentran altamente deteriorados mostrando índices de calidad de hábitat preocupantes [1]. Esta situación pone en riesgo la salud de las poblaciones cercanas, que a menudo cuentan con bajos recursos [2].

Una técnica ampliamente utilizada para mitigar este problema es la reintroducción de macrófitas acuáticas nativas en las riberas de los arroyos [3-4]. Estas plantas no solo embellecen el entorno y sirven como refugio para la biodiversidad, sino que también desempeñan un papel esencial en la purificación del agua, mejorando su calidad [5-6].

En este contexto, surge la necesidad de implementar estrategias prácticas para optimizar la restauración. Una de estas es el uso de biorrollos, estructuras a base de fibra vegetal rellenas de aserrín. Esta tecnología es económica y agiliza la reintroducción de plantas acuáticas [7]. Sin embargo, el lixiviado liberado por estos biorrollos al entrar en contacto con el agua podría afectar negativamente el desarrollo de las plantas. Esto da lugar a la primera pregunta de investigación: **¿Influye el lixiviado en el éxito de enraizamiento de las especies candidatas?**

Por otro lado, dado que la longitud radicular es un factor determinante para el éxito en los proyectos de restauración, resulta crucial identificar qué especie es más adecuada para ser reintroducida mediante esta técnica. En este contexto surge la segunda pregunta de investigación:  **¿Que macrófita acuática nativa presenta una mayor longitud radicular y de qué manera influye el lixiviado en su crecimiento?**

# Materiales y Métodos:

## Diseño experimental

El trabajo consistió en la evaluación del crecimiento y desarrollo radicular de tres especies de macrófitas acuáticas (Junco - *Shoenoplectus californicus*, Pehuajó - *Thalia geniculata* y Totora -*Typha latifolia*) en biorrollos con aserrín (Fig. 1). Con el objetivo de evaluar el efecto del lixiviado sobre el desarrollo radicular, 34 de los 66 biorrollos se sometieron a 15 días de remojo previos a la inicio de la experiencia removiendo así el lixiviado inicial. Luego se les asignó una planta a cada biorrollo. A los 93 días de iniciado el ensayo se midió el largo de la raíz más larga de cada planta desde la base del biorrollo.

## Análisis de datos

Se analizaron las dos preguntas de investigación de manera separada. Por un lado se buscó estimar la **Tasa de Enraizamiento** para las tres especies estudiadas, la cual se obtuvo a partir de un modelo lineal generalizado (GLM) de la variable dicotómica Presencia/Ausencia de raíz en función de la especie. Para evaluar la significancia de los resultados, se aplicó la prueba de Chi-cuadrado, estableciendo un nivel de significación de 0,05.

Por otro lado, para evaluar cuál de las combinaciones Especie-Tratamiento presentaba raíces más largas y por lo tanto era más conveniente para la restauración del arroyo, se filtró el conjunto de datos para estudiar exclusivamente las plantas que habían desarrollado raíz (largo radicular > 0). Luego se pusieron a prueba los supuestos para realizar un modelo de comparación de medias (ANOVA de dos factores). Al no cumplir el supuesto de normalidad se optó por pruebas no paramétricas (A1 y A2). La prueba global se realizó mediante Kruskal Wallis, con un nivel de significación 0,05. Luego se llevaron a cabo contrastes intra-específico mediante Wilcoxon (p-valor<0,05) e inter-específico mediante Dunn (p-valor< 0,0125, ajustado por Bonferroni).

Todos los análisis estadísticos se realizaron con el programa R-Studio.

# Resultados

Al final de la experiencia se obtuvieron los datos que se resumen en la Tabla 1. El diseño experimental completamente aleatorizado resultó desbalanceado, ya que no se obtuvo un número equitativo de individuos por especie, ni se asignaron de manera uniforme a los tratamientos. Esta falta de balance, sumada al número limitado de muestras, motivó la búsqueda de alternativas para maximizar la potencia estadística de las pruebas aplicadas.

A su vez, de las muestras asignadas a cada tratamiento, solo aquellas que desarrollaron raíz se emplearon para estudiar el efecto del lixiviado sobre la longitud de las raíces de las especies analizadas, disminuyendo aún más el tamaño muestral y en consecuencia afectando la potencia del modelo.

**Tabla 1:** Resumen de los datos obtenidos.

| Especie | Tratamiento | Cantidad de muestras | Plantas con raíz | Largo de raíz promedio |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Junco | **Con remojo** | 10 | 8 | 9,30 cm |
| **Sin remojo** | 12 | 8 | 10,10 cm |
| Pehuajó | **Con remojo** | 12 | 10 | 10,00 cm |
| **Sin remojo** | 12 | 10 | 19,60 cm |
| Totora | **Con remojo** | 12 | 8 | 4,08 cm |
| **Sin remojo** | 8 | 7 | 7,25 cm |

A continuación, se realizó un análisis exploratorio de los datos recopilados para determinar el tipo de modelado más adecuado.

### Análisis exploratorio

En cuanto al desarrollo radicular en los distintos tratamientos, se observó que, en promedio, el 77% de las plantas se desarrollaron exitosamente en los biorrollos. Dentro de los tratamientos, se registraron tendencias opuestas entre Junco y Totora: la primera presentó una mayor tasa de desarrollo radicular bajo el tratamiento con remojo, mientras que Totora mostró preferencia por los biorrollos sin remojar (Fig. 2).



Con el fin de analizar la distribución de los datos y determinar el modelo estadístico más adecuado para abordar la segunda pregunta de investigación, se llevó a cabo un gráfico de densidad. El mismo ilustra con claridad que la distribución muestral de la variable respuesta (Largo radicular) cambia entre especies y tratamientos (Fig. 3) Es destacable que en todas las especies se observa una tendencia a distribuciones bimodales en los tratamientos con remojo. La cual no se reconoce en las plantas con biorrollos sin tratamiento de remojo previo. Descartando así la posibilidad de aplicar cualquier modelo que requiera una distribución unimodal.

Respecto a la comparación del largo radicular obtenido bajo cada tratamiento en las tres especies, se registró una disminución de la media muestral cuando la planta se somete al tratamiento con remojo. En la Figura 4 se ilustran las tendencias generales de la muestra y la varianza de los datos. Si bien se registró una clara heterocedasticidad, no hay rastros de otros tipos de relación como por ejemplo proporcional a la media, característica clave de distribuciones de tipo Gamma.



Para evaluar la posible interacción entre la especie y el tratamiento se llevó a cabo un gráfico de perfiles (Fig. 5). En el cual se ve con mayor claridad que Junco no muestra grandes diferencias entre los tratamientos, en cambio las especies Pehuajó y Totora muestran mayor longitud radicular sin el tratamiento de remojo aunque con distinta magnitud de efecto. Queda en evidencia que no todas las especies responden en igual medida al tratamiento y por lo tanto se descarta la posibilidad de evaluar de manera independiente el efecto del lixiviado sobre el largo radicular.

### Modelado

Con el objetivo de estudiar si las tendencias muestrales representan diferencias significativas a nivel poblacional se llevó a cabo un modelado de datos para cada pregunta de investigación.

Primero se evaluó si dentro de cada especie el tratamiento afectaba de manera significativa la Tasa de Enraizamiento (TR) (Chi-cuadrado, p-valor>0,05). Al no encontrarse diferencias significativas se procedió estimando la TR en las tres especies estudiadas, mediante un modelo lineal generalizado (GLM) con la variable dicotómica "presencia/ausencia de raíz" como respuesta y la especie como variable explicativa. El análisis no mostró diferencias significativas en las tasas de enraizamiento entre las especies (Chi-cuadrado, p-valor>0,05). Empleando el modelo se estimó el intervalo de confianza correspondiente a cada TR (Tabla 2).

**Tabla 2:** Estimaciones desprendidas del modelo de regresión logística binaria.

| Especie | Tasa de enraizamiento estimada | Intervalo de confianza (95%) |
| --- | --- | --- |
| Junco | 72,7% | [51,87] |
| Pehuajó | 83,3% | [63,93] |
| Totora | 75,0% | [52,89] |

Para estudiar el efecto del lixiviado sobre el largo radicular de las tres especies estudiadas se optó por el modelado de tipo no paramétrico Kruskal-Wallis. En el análisis global se encontraron evidencias suficientes para reconocer que al menos una de las combinaciones Especie-Tratamiento difiere del resto (p-valor= 5,827e-05 ). Para estudiar con mayor detalle qué combinación presenta un mayor desarrollo radicular se llevaron a cabo pruebas de Wilcoxon dentro de cada especie. En caso de que la diferencia entre tratamientos sea significativa se descartó el tratamiento con menor largo radicular, de lo contrario se unieron dentro del mismo grupo. Luego los tres grupos obtenidos se contrastaron mediante una prueba de Dunn. Dado que se realizaron múltiples pruebas se ajustó el nivel de significancia original (α=0,05) mediante el método de Bonferroni evitando así que se dilaten las posibilidades de cometer un error de tipo I (Tabla 3).

**Tabla 3.** Contrastes entre tratamientos dentro de cada especie mediante la prueba de Wilcoxon. Contraste entre Junco, Pehuajó sin remojo y Totora sin remojo mediante Dunn.

| Especie | Contraste entre tratamientos | Contraste entre especies | |
| --- | --- | --- | --- |
| P-valor | Junco | Pehuajó |
| Junco | 0.528 | - | 0.0055\* |
| Pehuajó | 0.0003\* | 0.0055\* | 0.0002\* |
| Totora | 0.0386ᆞ | 0.1524 | 0.0002\* |

“ᆞ” = P-valor<0.05

“\*” = P-valor < 0.0125 (significancia ajustada por Bonferroni).

El largo radicular de cada tratamiento se estimó mediante bootstrap. A partir de las medianas y los intervalos de confianza obtenidos, se confeccionó la Figura 6. Pehuajó sin remojo se destaca con una mediana estimada de 23 (IC al 95% [22, 25]). Siendo esta la mayor de todas las combinaciones Especie-Tratamiento y solo solapando con el IC de Junco sin el tratamiento de remojo. De todos modos a partir de las pruebas anteriores resulta evidente que sus distribuciones son distintas.

# 

# 

# 

# Discusión

En cuanto a la tasa de enraizamiento, no se encontraron evidencias suficientes para afirmar que el tratamiento de los biorrollos o la especie influyan de manera significativa en esta variable. Sin embargo se observó que Pehuajo presenta cierta tendencia a un mayor éxito en el desarrollo radicular, estimado en el 83,3%, lo que sugiere un mejor desempeño en comparación con el resto de las especies analizadas.

Por otro lado, en los estudios realizados sobre el largo radicular se puede destacar que a pesar de que el tratamiento no afectó en igual medida a todas las plantas, en todas las especies se encontró cierta tendencia a desarrollar raíces más largas cuando los biorrollo no habían sido sometidos al tratamiento de remojo. Esta diferencia resultó estadísticamente significativa tanto en la especie Totora como Pehuajó (Wilcoxon, p-valor<0,05).

Estos dos aspectos son evidencias en contra de la hipótesis de que el lixiviado de los biorrollos tienen un efecto negativo sobre el crecimiento y desarrollo radicular. En especial el segundo punto dado que no solo no se encontraron efectos adversos, sino que se detectaron efectos positivos estadísticamente significativos.

De todas las combinaciones Especie-Tratamiento estudiadas la que presentó una longitud radicular significativamente mayor al resto fue Pehuajó sin remojo (Dunn, p-valor < 0,0125) .

Por lo tanto, considerando la importancia del desarrollo de raíces largas para la estabilidad y éxito en el repoblamiento de arroyos urbanos, y los resultados obtenidos en esta investigación, se sugiere ahorrarse los esfuerzos de tratar previamente los biorrollos independientemente de cuál de las tres especies se vaya a implementar. Además, en caso de poder elegir qué planta introducir y bajo qué tratamiento, la especie Pehuajó sin remojo es la opción más favorable para estos proyectos. Su combinación de una elevada tasa de enraizamiento y la capacidad de generar raíces significativamente más largas la posicionan como una candidata óptima para la restauración de ambientes acuáticos.

# Bibliografía

**[1 ] Perrow, M. R., & Davy, A. J. (2002).** *Handbook of ecological restoration*. Cambridge University Press.

**[2 ] Nieto Rosas, I. (2013).** *La contaminación de la Cuenca Matanza-Riachuelo: Análisis de la respuesta institucional con respecto a la salud de la población del barrio de La Boca* (Independent Study Project Collection No. 1582). SIT Study Abroad.<https://digitalcollections.sit.edu/isp_collection/1582>

**[3 ] Delgadillo-López, A. E., González-Ramírez, C. A., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J. R., & Acevedo-Sandoval, O. (2011).** Fitorremediación: Una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems, 14*(2), 597-612. Recuperado el 23 de septiembre de 2024, de<http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000200002&lng=es&tlng=es>

**[4 ] Wang, J., Liu, X. D., & Lu, J. (2012).** Urban river pollution control and remediation. *Procedia Environmental Sciences, 13*, 1856-1862.<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.179>

**[5 ] Purcell, A. H., Friedrich, C., & Resh, V. H. (2002).** An assessment of a small urban stream restoration project in Northern California. *Restoration Ecology, 10*(4), 685-694.<https://doi.org/10.1046/j.1526-100X.2002.01049.x>

**[6 ] Efron, S., Aquino, J. E., de Cabo, L. I., Dos Santos Afonso, M., & Graziano, M. (2014).** Evaluación de la capacidad de auto-depuración de un arroyo urbano y el uso de macrófitas nativas como estrategia de restauración. *Biología Acuática*, (30), 275–285. Recuperado de<https://revistas.unlp.edu.ar/bacuatica/article/view/7722>

**[7 ] Gomez, B., Feijoó, C., & Graziano, M. (2023).** Rehabilitación ecológica funcional de un tramo de un arroyo urbano desde un abordaje participativo: Caracterización y propuesta de intervención. *Repositorio Institucional Universidad Nacional de Luján*.<http://ri.unlu.edu.ar/xmlui/handle/rediunlu/2306>

# 

# Apéndice

#### A1. Evaluación de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas del modelo lineal de comparación de medias (Modelo 1).

Tanto en las pruebas estadísticas (Levene y Shapiro-Wilk) como en los análisis gráficos (Apéndice Fig. 1) se evidenció el incumplimiento de los supuestos de normalidad y homocedasticidad del modelo.

Pruebas estadísticas:

Levene: p-valor = 0,00189

Shapiro-Wilk: p-valor = 0,02489

#### 

#### 

#### A2. Evaluación de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas del modelo lineal de comparación de medias con modelado de varianza mediante VarIdent (Modelo 2).

Si bien el modelado de varianza dio resultado sobre la heterocedasticidad la falta de normalidad persiste (Apéndice Fig 2). Además si observamos los gráficos de densidad (Fig. 3) es claro que la distribución bimodal no podrá ser forzada a una distribución normal.

#### 