Tu Tala Amigo: plataforma web abierta para el seguimiento fenológico participativo de árboles nativos de Argentina

Evelyn Figueroa Schibber; IFEVA-CONICET-UBA; Argentina; eschibber@agro.uba.ar; https://orcid.org/0009-0009-4223-8846.
Débora Cintia Chamorro; IICAR-CONICET-UNR; Argentina; chamorro@iicar-conicet.gob.ar; https://orcid.org/0000-0003-4454-8919.
Rocío Contestin; Jardín Botánico "Carlos Thays"; Argentina; rociomcg98@gmail.com.
Natalia Rodríguez; Museo Argentino de Ciencias Naturales "Bernardino Rivadavia" CONICET; Argentina; natrodriguez@agro.uba.ar; https://orcid.org/0000-0002-7880-5840.
Cecilia Molina; Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires; Argentina; cdmolina@agro.uba.ar; https://orcid.org/0000-0001-8580-6553.
Cristian Malavert; Cátedra de Cultivos Industriales, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires; Argentina; malavert@agro.uba.ar; http://orcid.org/0000-0002-6565-2638.
Mariano Fressoli; CENIT-UNSAM-CONICET; Argentina. mfressoli@unsam.edu.ar; https://orcid.org/0000-0003-4060-0943.
Pedro Maximiliano Tognetti; IFEVA-CONICET-UBA; Argentina; tognetti@agro.uba.ar, https://orcid.org/0000-0001-7358-1334.
Mariela Verónica Lacoretz; IFEVA-CONICET-UBA; Argentina; mariela.lacoretz@gmail.com; https://orcid.org/0000-0003-1323-3631.

Palabras clave: Ciencia ciudadana, Fenología, Infraestructura digital abierta, Restauración ecológica

1.Introducción

Argentina ha perdido miles de hectáreas de bosques nativos en los últimos años debido a la deforestación, los incendios, la invasión de especies exóticas y el avance no planificado de la urbanización. Frente a este escenario, el proceso de restauración implica recomponer un ecosistema que ha sido degradado o destruido y no resulta sencillo (SER, 2004). Se necesita disponer de semillas, plantas y nuevos conocimientos, pero también del compromiso de la sociedad para impulsar proyectos de restauración legítimos y sostenibles (Gross, 2006; Ceccon y Pérez, 2016). La ciencia ciudadana que involucra a personas por fuera de la academia en la generación de conocimiento es la herramienta y el medio que permite que todos los involucrados puedan participar de los proyectos y apropiarse de sus resultados (Vera, 2018; Norström et al., 2020). Dado que además la ciencia ciudadana permite obtener resultados de manera más eficiente, rápida y con un mayor alcance, su implementación es clave para ayudar a la rápida restauración de los bosques nativos.

En los proyectos de restauración, la provisión de semillas suele ser una gran limitante para la producción de plantas nativas (León-Lobos et al., 2020). Esto podría mejorar si se sabe cuándo y dónde recolectar las semillas al tener en cuenta los datos fenológicos de las especies (Buisson et al., 2017). La fenología es el arte de observar las fases del ciclo vital de plantas en su ocurrencia temporal a lo largo del año (Lieth, 1974). Dado que deben captarse eventos, tales como floración o fructificación, que se producen en diferentes lugares de manera simultánea, es necesaria la acción coordinada de muchas personas. La manera colaborativa de obtener información fenológica de las plantas constituye una de las formas de investigar en red más antiguas, siendo Linneo quien estableció la primera red de observación en 1751 (Lieth, 1974). Este tipo de redes se mantienen hasta la actualidad a través de la ciencia ciudadana principalmente en el hemisferio norte (Beaubien y Hamann, 2011; Rosemartin et al., 2021, Iwanycki Ahlstrand et al., 2022), aunque no existen redes especializadas en Argentina.

Las aplicaciones web constituyen una forma de organizar la información proveniente de la ciencia ciudadana. En América Latina, donde los registros ambientales suelen ser escasos o fragmentados, el desarrollo de herramientas abiertas adquiere un valor estratégico. La dependencia de plataformas comerciales o extranjeras limita la capacidad de los equipos locales para adaptar los sistemas a sus necesidades, mantener el control sobre los datos y asegurar su sostenibilidad. Desarrollar

y compartir aplicaciones web de código abierto se vuelve, por tanto, una vía para democratizar la infraestructura científica y potenciar la colaboración regional.

Por estas razones desarrollamos *Restaura*, una aplicación web de código abierto creada para recolectar datos fenológicos de especies nativas. Su primera convocatoria, *Tu Tala Amigo*, se enfocó en *Celtis* spp., un árbol nativo de Argentina presente en bosques en peligro. La arquitectura modular y documentación abierta de esta aplicación web permiten que puedan ser adaptados los formularios, variables y protocolos a otras especies y objetivos. *Restaura* constituye, así, un ejemplo de cómo una necesidad local puede transformarse en una infraestructura abierta y replicable de ciencia ciudadana.

El objetivo general de este trabajo fue desarrollar una aplicación web de código abierto con la finalidad de estandarizar datos fenológicos en proyectos de ciencia ciudadana. En este trabajo se describe la arquitectura técnica y las funcionalidades principales de la aplicación. A su vez, se muestran los primeros resultados relacionados a su uso en la recolección de datos fenológicos de *Celtis* spp. en Argentina.

2. Materiales y métodos

El desarrollo de la plataforma *Restaura* se guió por dos principios rectores: accesibilidad y reproducibilidad. La accesibilidad implicó que la aplicación pudiera utilizarse desde cualquier dispositivo con conexión a internet, computadoras, tablets o teléfonos móviles, sin necesidad de instalar software adicional. La reproducibilidad se aseguró mediante el uso de tecnologías libres y ampliamente disponibles, lo que permitió replicar el sistema en entornos de servidor estándar sin depender de servicios externos.

Arquitectura del sistema

La aplicación fue diseñada siguiendo una arquitectura clásica de tres capas, lo que favoreció su organización modular y posterior adaptación.

La capa de presentación, correspondiente a la interfaz visible para los usuarios, se implementó utilizando la plantilla SB Admin 2 de StartBootstrap (https://startbootstrap.com/theme/sb-admin-2), basada en Bootstrap 4 y complementada con FontAwesome para la iconografía. Sobre esta base se desarrollaron múltiples componentes en JavaScript, incluyendo validaciones de formularios, actualización dinámica de contenidos y generación de gráficos interactivos. También se emplearon scripts propios y librerías jQuery para mejorar la experiencia de usuario y optimizar el funcionamiento en distintos dispositivos. Se priorizó la responsividad, de modo que los formularios y visualizaciones pudieran manipularse fácilmente desde teléfonos móviles, tablets o computadoras, condición indispensable para el registro de datos en campo.

La capa de aplicación, desarrollada en PHP, concentró la lógica del sistema: autenticación de usuarios, operaciones básicas de creación, lectura, actualización y eliminación de registros (CRUD), generación de gráficos dinámicos y exportación de datos en formatos abiertos y familiares (CSV y Excel). El código se organizó en módulos independientes para funciones principales, gestión de datos y visualización, generando gráficos interactivos a partir de consultas a la base de datos y ofreciendo retroalimentación inmediata a los participantes.

La capa de datos se implementó en MySQL, alojada en el mismo servidor Apache–PHP. La estructura incluyó una tabla de usuarios (con credenciales encriptadas y roles de acceso), una de ejemplares (con coordenadas geográficas y atributos asociados) y una de eventos fenológicos (fecha, estado fenológico y evidencia fotográfica). Se añadieron tablas auxiliares para registrar la actividad de los participantes, como el historial de inicios de sesión, lo que permitió evaluar la dinámica de uso.

El sistema fue diseñado para una instalación sencilla en entornos tipo LAMP (Linux, Apache, MySQL, PHP). El procedimiento consiste en desplegar los archivos fuente en el directorio raíz de Apache, importar la base de datos mediante el script “EstructuraDB.sql”, que define el esquema de tablas, y configurar los parámetros de conexión en el archivo “db_connect.php”. Con este proceso, el sistema queda operativo sin dependencias adicionales. Se prevé publicar un manual de usuario en el repositorio de GitHub para facilitar la instalación y adaptación de la herramienta.

Convocatoria y participación

La convocatoria de colaboradores combinó talleres presenciales, difusión en redes sociales y articulación con viveros. Las redes sociales funcionaron como canal principal de contacto y derivación al sitio, donde los participantes podían conocer los objetivos del proyecto y registrarse. A cada participante se le asignó un usuario y contraseña para acceder a la aplicación y registrar sus observaciones. Los participantes recibieron materiales de apoyo y recordatorios digitales difundidos en redes sociales, que promovieron la continuidad de los registros. Esta articulación entre redes sociales, sitio web y formulario en línea sigue la lógica de otros proyectos de ciencia ciudadana basados en tecnologías web, que combinan entornos digitales para favorecer la comunicación, el aprendizaje y la recolección de datos (Batsaikhan et al., 2020).

Funcionalidades

Las funcionalidades principales incluyen autenticación y gestión de usuarios, ingreso y edición de observaciones fenológicas mediante formularios en línea, visualización de datos acumulados en forma de gráficos y mapas interactivos, y exportación de registros en formato CSV o Excel. Estas herramientas fueron pensadas para combinar simplicidad de uso con robustez científica.
En los proyectos de ciencia ciudadana que implican la recolección de datos espaciales, los mapas cumplen un rol central al permitir visualizar, ubicar y validar la información. Por ello, la aplicación incorporó un mapa interactivo (Leaflet) con tres opciones para registrar la localización: (i) ingresar las coordenadas manualmente, (ii) buscar la dirección y posicionar el árbol directamente en el mapa, o (iii) indicar el ID de *Argentinat* (versión argentina de *iNaturalist*), a partir del cual el equipo completa las coordenadas. Esta implementación flexible puede adaptarse fácilmente a otros proyectos. El protocolo de carga se centró en la estandarización. Cada observación debía asociarse a un ejemplar previamente registrado y georreferenciado, al que los participantes debían asignar un nombre propio para reconocerlo fácilmente. Se los invitó a visitarlo con la mayor frecuencia posible, especialmente en los cambios de estación, para registrar los estados fenológicos observados. Los estados fenológicos incluidos fueron brotación, floración, fructificación y senescencia, representados en la aplicación mediante botones ilustrados con fotografías de referencia, que facilitaron la identificación visual y la selección del estado correspondiente. La aplicación admitió la carga opcional de fotografías, lo que permitió validar los registros y construir un repositorio visual de referencia.

Siguiendo buenas prácticas de ciencia abierta, se solicitó consentimiento informado para la difusión de ubicaciones y fotografías, equilibrando la apertura de los datos con la protección de la privacidad. Los datos completos se resguardan en el servidor del proyecto y se comparten de manera agregada o anonimizada.

3. Resultados

La plataforma *Restaura* se publicó bajo licencia de software libre en un repositorio público de GitHub (https://github.com/RESTAURA-project/Tu-Tala-Amigo), lo que garantiza su disponibilidad y posibilidad de reutilización por parte de otros equipos.

Desde su lanzamiento, la plataforma *Restaura* registró la participación de 233 usuarios de ocho provincias argentinas, quienes documentaron 140 ejemplares de *Celtis* spp. Este uso inicial permitió validar el funcionamiento general del sistema, confirmando la estabilidad del flujo de datos (registro, carga de imágenes, georreferenciación y almacenamiento).

La mayoría de los registros (98%) incluyó fotografías de los individuos observados, lo que facilitó la validación visual de las especies y estados fenológicos. En 81 casos (58%), los participantes incorporaron coordenadas geográficas, permitiendo georreferenciar los ejemplares y analizar patrones espaciales.

El análisis de las interacciones mostró que la interfaz (Figura 1) fue comprendida sin necesidad de asistencia técnica, lo que respalda los principios de accesibilidad y usabilidad adoptados en el diseño. Además, las pruebas realizadas en distintos dispositivos y navegadores confirmaron la compatibilidad esperada.

Si bien el número de registros aún es escaso, la diversidad geográfica de los aportes y la calidad de las observaciones evidencian el potencial como infraestructura abierta adaptable a otras especies y regiones.

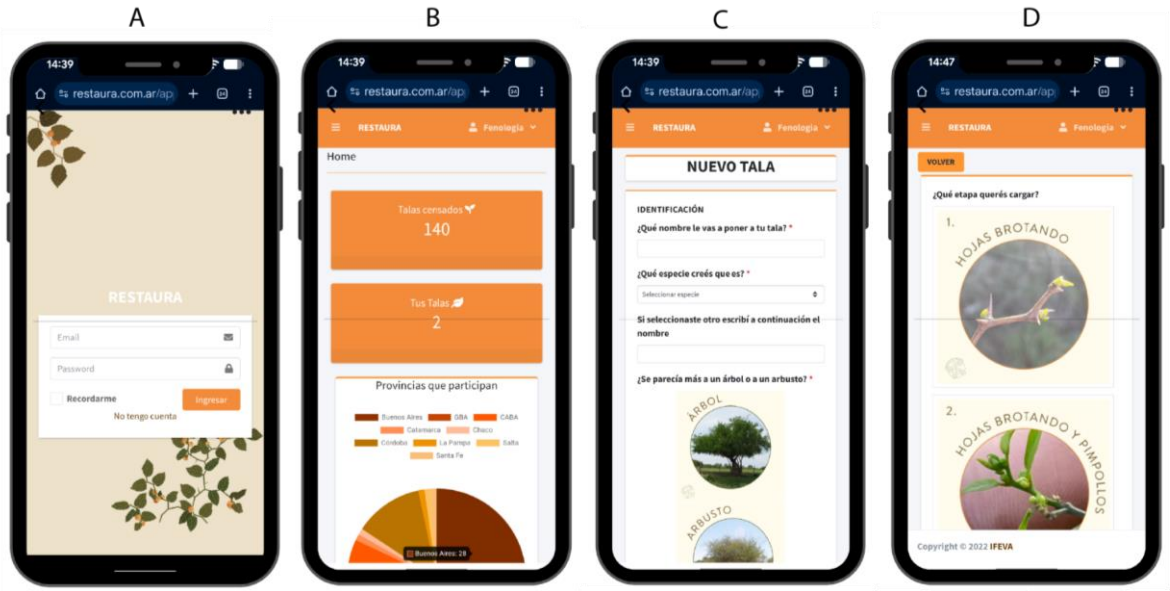


Figura 1. Ejemplos de interfaz de *Restaura* (vista móvil). A) Acceso mediante usuario y contraseña; B) Pantalla inicial; C) Registro de un nuevo ejemplar; D) Carga de una etapa fenológica. Texto alternativo: Cuatro capturas de pantalla muestran las principales vistas móviles de la aplicación *Restaura*: inicio de sesión, panel principal, formulario de nuevo ejemplar y registro de etapa fenológica.

4. Discusión

En los últimos años, la proliferación de repositorios públicos en plataformas como GitHub, donde actualmente pueden encontrarse más de 270 proyectos etiquetados como aplicaciones de ciencia ciudadana (https://github.com/topics/citizen-science), consultado en septiembre de 2025), refleja el crecimiento sostenido del campo y la diversidad de enfoques técnicos existentes. Esta expansión muestra que la ciencia ciudadana se apoya cada vez más en herramientas digitales desarrolladas localmente, muchas de las cuales responden a necesidades concretas de observación o gestión de datos. En este contexto, *Restaura* se suma a ese conjunto de iniciativas abiertas, aportando una solución sencilla y adaptable para registrar y organizar observaciones fenológicas en entornos comunitarios, y formando parte del ecosistema emergente de infraestructuras digitales abiertas que promueven la colaboración y la sostenibilidad tecnológica.

La experiencia de *Restaura* muestra en la práctica cómo una infraestructura digital abierta, y desarrollada localmente puede utilizarse para organizar y estandarizar datos fenológicos en proyectos de ciencia ciudadana. La aplicación se probó en un caso concreto y funcionó como una herramienta útil para centralizar observaciones, mantener la trazabilidad de los ejemplares y facilitar la participación de la comunidad. Estos resultados iniciales no buscan probar un modelo nuevo, sino compartir una solución replicable y adaptable que pueda ser aprovechada por otros equipos o iniciativas con objetivos similares.

Durante los primeros meses de uso, el sistema experimentó un incidente de seguridad que comprometió temporalmente la aplicación. Este episodio puso en evidencia la necesidad de fortalecer las rutinas de validación y protección de credenciales. Como respuesta, se revisaron los mecanismos de acceso y se reemplazó la encriptación de contraseñas por el algoritmo MD5, además de modificar la estructura de consultas a la base de datos para prevenir posibles inyecciones o accesos no autorizados. Este proceso de revisión permitió mejorar la seguridad general de la aplicación y reafirmar la importancia de incorporar prácticas de desarrollo seguro en proyectos de código abierto.

En comparación con plataformas internacionales, la propuesta ofrece ventajas para proyectos locales de restauración. Al basarse en software libre y alojarse en un servidor independiente, garantiza independencia tecnológica y soberanía de los datos. No obstante, la necesidad de conexión a internet

limita parcialmente su uso en zonas rurales, y el ingreso de datos mediante formularios puede desincentivar a usuarios con menor familiaridad digital.

El enfoque ético adoptado, incluyendo el consentimiento informado y el resguardo de información sensible, concilia la apertura de los datos con la protección de la privacidad de los participantes, en línea con enfoques contemporáneos que amplían los principios FAIR (siglas del inglés Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) mediante criterios de cuidado y gobernanza responsable.

Más allá de los aspectos técnicos, la sostenibilidad de las plataformas de ciencia ciudadana depende también de su comunidad de usuarios. El uso de licencias abiertas favorece la reutilización científica y educativa, mientras que una estructura simple garantiza su funcionamiento más allá del equipo impulsor. La construcción de una comunidad activa de intercambio entre ciudadanos y científicos se consolida como el eje para asegurar la continuidad y mejorar la calidad de los datos.

A futuro, se proyecta ampliar el sistema a nuevas especies nativas y consolidar una red colaborativa regional que fortalezca la toma de decisiones en restauración ecológica. *Restaura*, disponible en GitHub, puede descargarse, instalarse y adaptarse fácilmente a distintos contextos, invitando a nuevos equipos a usarla, modificarla y ampliarla. La combinación entre participación ciudadana e infraestructuras digitales abiertas tiene la potencialidad de generar conocimiento riguroso, inclusivo y con impacto territorial.

Declaración de uso de IA:

Se utilizó ChatGPT (modelo GPT-5 mini, OpenAI, septiembre 2025) como herramienta de apoyo para la redacción y organización del resumen ampliado. Todo el contenido generado fue revisado, editado y validado manualmente por los autores.

Agradecimientos y financiamiento

Agradecemos a todas las personas que participaron en la convocatoria *Tu Tala Amigo*, registrando sus ejemplares y compartiendo observaciones que hicieron posible esta experiencia de ciencia ciudadana.

El desarrollo del proyecto contó con el apoyo del programa Fortalecimiento y Promoción de Proyectos de Ciencia Ciudadana del entonces Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Nación Argentina– Convocatoria 2022.

Referencias

Batsaikhan, A., Hachinger, S., Kurtz, W., Heller, H., & Frank, A. (2020). *Application of modern web technologies to the citizen science project BAYSICS on climate research and science communication. Sustainability, 12*(18), 7748. https://doi.org/10.3390/su12187748

Beaubien, E. G., & Hamann, A. (2011). Plant phenology networks of citizen scientists: Recommendations from two decades of experience in Canada. *International Journal of Biometeorology, 55*(6), 833–841. https://doi.org/10.1007/s00484-011-0457-y

Buisson, E., Alvarado, S. T., Le Stradic, S., & Morellato, L. P. C. (2017). Plant phenological research enhances ecological restoration. *Restoration Ecology, 25*(2), 164–171. https://doi.org/10.1111/rec.12495

Ceccon, E., & Pérez, D. R. (2016). *Más allá de la ecología de la restauración: Perspectivas sociales en América Latina y el Caribe.* Sociedad Iberoamericana y del Caribe de Restauración Ecológica; Vázquez Mazzini Editores.

Gross, M. (2006). Beyond expertise: Ecological science and the making of socially robust restoration strategies. *Journal for Nature Conservation, 14*(3–4), 172–179. https://doi.org/10.1016/j.jnc.2006.01.001

Iwanycki Ahlstrand, N., R. B. Primack, y A. P. Tøttrup. (2022). A comparison of herbarium and citizen science phenology datasets for detecting response of flowering time to climate change in

Denmark. International Journal of Biometeorology:849-862.

León-Lobos, P., Bustamante-Sánchez, M. A., Nelson, C. R., Alarcón, D., Hasbún, R., Way, M., Pritchard, H. W., & Armesto, J. J. (2020). Lack of adequate seed supply is a major bottleneck for effective ecosystem restoration in Chile: Friendly amendment to Bannister et al. (2018). *Restoration Ecology, 28*(2), 277–281. https://doi.org/10.1111/rec.13118

Lieth, H. (1974). *Phenology and seasonality modeling.* Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-51863-8

Norström, A. V., Cvitanovic, C., Löf, M. F., West, S., Wyborn, C., Balvanera, P., Bednarek, A. T., Bennett, E. M., Biggs, R., de Bremond, A., Campbell, B. M., Canadell, J. G., Carpenter, S. R., Folke, C., Fulton, E. A., Gaffney, O., Gelcich, S., Jouffray, J.-B., Leach, M., & Österblom, H. (2020). Principles for knowledge co-production in sustainability research. *Nature Sustainability, 3*(3), 182–190. https://doi.org/10.1038/s41893-019-0448-2

Rosemartin, A., T. Watkins, y A. J. Miller-Rushing. (2021). Monitoring phenology in US national parks through citizen science: Some preliminary lessons and prospects for protected areas. Parks Stewardship Forum 37.

Society for Ecological Restoration International (SER). (2004). *Principios de SER International sobre la restauración ecológica.*

Vera, C. (2018). Farmers transformed how we investigate climate. *Nature, 562*(7725), 9. https://doi.org/10.1038/d41586-018-06856-6

Licencia: Este resumen ampliado se distribuye bajo licencia Creative Commons Attribution Non Commercial Share Alike 4.0 International (CC-BY-NC-SA 4.0).

.