

INTERFAZ BIDIRECCIONAL CEREBRO-PLANTA

Sonificación musical y bioelectricidad en Pelargonium crispum: marco teórico, protocolo experimental y módulo docente para Educo Academy

Sergio Montoya Diez

Valladolid · 06/06/2026

ORCID: 0009-0004-6158-1993

Nota sobre el estatus de este documento

Este trabajo combina tres tipos de contenido con estatus epistemológico muy distinto: (1) ciencia establecida sobre electrofisiología vegetal, respaldada por literatura revisada por pares; (2) un protocolo experimental original propuesto, que NO ha sido ejecutado; y (3) datos simulados/ilustrativos que muestran qué forma podrían tener los resultados SI el protocolo se ejecutara, generados para fines pedagógicos. Estas tres categorías se identifican explícitamente en cada sección mediante etiquetas y recuadros de color. Ningún dato de este documento debe citarse como hallazgo experimental real.

Índice

1. Resumen

Este documento presenta un marco teórico y un protocolo experimental original para una interfaz bidireccional entre humanos y plantas, basada en la sonificación de señales bioeléctricas del geranio de olor a limón (*Pelargonium crispum*). El proyecto traduce la actividad electrofisiológica vegetal en sonido y propone, a la inversa, estimular la planta mediante pulsos electromagnéticos codificados musicalmente. El documento está organizado como módulo docente de 40 horas para Educo Academy, con bloques teóricos, prácticos y de evaluación, e incluye un protocolo de réplica en aula, un conjunto de datos simulados con fines exclusivamente ilustrativos, y una hoja de ruta especulativa a cinco años.

Objetivo del documento: convertir el material original en un recurso didáctico riguroso, separando con claridad la ciencia consolidada, la propuesta experimental no verificada y la especulación prospectiva — un requisito imprescindible si el material se va a publicar o indexar académicamente.

2. Fundamento teórico

2.1 Electrofisiología vegetal (ciencia establecida)

Las plantas carecen de sistema nervioso centralizado, pero presentan fenómenos bioeléctricos bien documentados en la literatura de fisiología vegetal:

- Potenciales de acción (AP): rápidos y autopropagados.
- Potenciales de variación (VP): de origen hidráulico-eléctrico, asociados a heridas.
- Señales propagadas por floema (SP): lentas y de naturaleza química.

Estas señales siguen, de forma simplificada, una ley de Ohm bioeléctrica:

$$V = I \cdot R$$

donde V se mide en μV – mV , I corresponde al flujo iónico (K^+ , Ca^{2+} , Cl^-) y R es la resistencia tisular, variable según la turgencia celular. Bajo estrés abiótico (hídrico, salino), el ácido abscísico (ABA) se acumula y despolariza membranas a través de canales iónicos (p. ej. KAT1, AKT2), propagando pulsos a 1–10 cm/s por xilema y floema.

Las micorrizas arbusculares (Glomeromycota) pueden amplificar y extender estas señales a través de redes hifales, fenómeno divulgativamente descrito como "internet micorrízico", con velocidades de transmisión del orden de 1 mm/s.

Por qué el geranio de olor

El *Pelargonium crispum* se eligió por su densidad micorrízica (hasta un 80% de colonización radicular reportada en condiciones de cultivo), su rapidez de respuesta (AP en menos de 5 s ante estímulos) y la presencia de aceites esenciales (citronelol) que modulan la conductividad tisular.

2.2 "Neurobiología vegetal": analogía, no consenso científico

Aviso de interpretación

El término "neurobiología vegetal" y expresiones como "aprendizaje" o "memoria" en plantas son metáforas funcionales ampliamente usadas en biología vegetal computacional, pero NO implican

procesos cognitivos ni un sistema nervioso. Su uso aquí es analógico y debe presentarse como tal en cualquier difusión del material.

Dentro de esa lectura analógica, se describe a las plantas como sistemas de "inteligencia distribuida": gradientes hormonales (auxinas, giberelinas), gradientes iónicos y osciladores de Ca^{2+} coordinan respuestas adaptativas. Ejemplos citados en la literatura incluyen la habituación en *Mimosa pudica* (reducción de la respuesta de plegado tras estimulación repetida) y la anticipación de sombra en *Arabidopsis*. La propuesta de sonificación traduce voltajes altos en notas agudas/rápidas (asociadas a estrés) y voltajes bajos en notas graves/lentas (homeostasis).

2.3 Marco interdisciplinario

El proyecto se apoya en cuatro marcos conceptuales: biofísica (adaptaciones bioelectromagnéticas), cibernética (bucles de retroalimentación de Ashby), semiótica vegetal (la señal electroquímica como signo) y posthumanismo (la noción de simbiogénesis humano-planta de Donna Haraway). Estos marcos sitúan el proyecto como una propuesta artístico-pedagógica e interdisciplinar, no como una afirmación biomédica.

3. Hipótesis del protocolo propuesto

Las siguientes hipótesis están formuladas para un protocolo que aún no se ha ejecutado. Se presentan en formato falsable, como debe hacerse en cualquier preregistro.

- H1 (principal): los estímulos electromagnéticos codificados musicalmente inducen el cese del patrón de AP asociado a sed, mediante asociación condicionada previa al riego.
- H2: la latencia de respuesta disminuye con los ciclos de exposición (plasticidad micorrízica).
- H3: los espectros sonoros se correlacionan con proxies metabólicos ($\downarrow$ ABA, $\uparrow$ auxinas).
- H0 (nula global): cualquier efecto observado se explica por artefactos electromagnéticos o térmicos, no por una respuesta biológica específica.

Diseño de control previsto: cegamiento del observador, $n \geq 50$ réplicas por planta, y los controles detallados en la sección 5.3.

4. Materiales y montaje experimental

Coste estimado para 10 estaciones de aula: menos de 150 €. Condiciones ambientales recomendadas: 22 °C, 60% HR, iluminación LED de espectro completo en ciclo 12/12h, y malla de Faraday artesanal (rejilla metálica + toma de tierra) para reducir ruido electromagnético ambiental.

Componente	Especificación	Función	Proveedor orientativo	Coste unit.
Planta	Geranio de limón 30–40 cm, micorrizas naturales	Sujeto experimental	Vivero local	5 €
Electrodos	Ag/AgCl reutilizables, 1 cm ² , gel conductor	Captación de μV	Farmacia / online	15 €

Componente	Especificación	Función	Proveedor orientativo	Coste unit.
Amplificador	INA118 o LM358, ganancia 1000x, filtro notch 50 Hz	Limpieza de señal	Kit electrónica	10 €
Microcontrolador	ESP32-WROOM, ADC 12 bits, 1 kHz	Muestreo / FFT	Distribuidor electrónica	10 €
Transductor EM	Bobina (100 vueltas AWG28), 1–5 Vpp, 1–100 Hz	Estímulo hifal	DIY (núcleo de ferrita)	5 €
Software	Python 3: PySerial, PyAudio, NumPy, SciPy, Matplotlib	Sonificación / análisis	Software libre	0 €
Accesorios	Guante háptico (vibradores 100–500 Hz), osciloscopio USB	Retroalimentación humana	Distribuidor online	20 €
Apantallado	Malla de Faraday 1×1 m + tierra	Reducción de ruido	Ferretería	15 €

Esquema de señal: Electrodos → Amplificador (ganancia $G = 1 + R_f/R_g$) → ADC del ESP32 → mapeo en Python → salida de audio → bucle al transductor.

5. Protocolo experimental propuesto (14 días)

Estatus

Protocolo original propuesto, no ejecutado. Se presenta con el nivel de detalle necesario para que pueda preregistrarse y replicarse de forma independiente.

5.1 Fase 0 — Preparación (48 h)

- Propagación: esquejes de geranio (enraizamiento en 2 semanas, perlita a pH 6,2).
- Calibración multi-planta: 4 h de línea base por planta; inducción de estrés (sin riego, 48 h).

5.2 Fase 1 — Unidireccional (n=50 repeticiones/planta, 5 plantas)

- Muestreo a 1 kHz; filtro Butterworth paso-bajo de 50 Hz.

Mapeo propuesto: $f = 261 + 20 \cdot \Delta V + 50 \cdot f_{\text{pulso}}$ (Hz); la amplitud de la señal se mapea a volumen.

- Patrones de referencia: pulso triple (sed), ráfaga irregular (daño mecánico).

5.3 Fase 2 — Bidireccional básica (n=100 ciclos)

1. Detección de estrés: pico FFT > 3 Hz.
2. Respuesta humana: vocalización en "z" (A4, 440 Hz) o generador de tonos.
3. Estímulo EM: onda cuadrada 1 Vpp, 50% de ciclo de trabajo, duración igual a la nota.
4. Ventana de 60 s previa al riego → 50 ml de agua → seguimiento 2 h post-riego.

5.4 Fase 3 — Controles rigurosos (n=200)

- C1 — EM simulado (frecuencia fuera del rango 1–100 Hz).
- C2 — Solo audio, sin estímulo EM.
- C3 — Planta simulada (electrodos inactivos).
- C4 — Cegamiento del investigador respecto a la condición.
- C5 — Multi-planta (red micorrízica compartida).

5.5 Fase 4 — Habitación / plasticidad

Más de 200 ciclos para evaluar si la latencia de respuesta cae por debajo de 2 s, con variaciones de frecuencia (200 Hz para estímulo radicular, 440 Hz general) e intensidad (0,5–2 V).

5.6 Fase 5 — Análisis estadístico planificado

Variables: amplitud de AP (μV), frecuencia (Hz), latencia (s), espectro FFT (0–50 Hz), proxy de ABA (conductancia). Análisis previstos: ANOVA de dos vías, regresión logística (cese ~ ciclos), y análisis de potencia estadística ($n=50$, tamaño de efecto esperado $d=0,8$) — este último debe calcularse antes de recoger datos reales, no después.

6. Resultados simulados (ilustrativos, NO experimentales)

Lectura obligatoria antes de esta sección

Los valores siguientes (porcentajes, p-valores, intervalos de confianza, tamaño del efecto) son completamente simulados para mostrar qué forma tendría una tabla de resultados si el protocolo se ejecutara con éxito. No proceden de ningún experimento real, no se han recogido datos, y no deben citarse, publicarse ni indexarse como hallazgos. Su único propósito es pedagógico: enseñar a los alumnos de Educo a leer e interpretar este tipo de tablas antes de generar las suyas con datos reales.

6.1 Tabla ilustrativa de cese pre-riego por ciclo (datos simulados)

Ciclo	Plantas (n)	% cese simulado	Latencia media (s)	Pico FFT pre (Hz)	Pico FFT post (Hz)	p (ilustrativo)
1–10	5	65%	12,4	3,5	1,2	0,03
11–50	5	78%	8,9	3,2	0,8	0,001
51–100	5	92%	4,2	2,9	0,1	<0,001
Control	5	12%	N/D	persiste	persiste	0,89

Patrón ilustrativo global simulado: cese medio del 82% (IC95% ilustrativo: 78–86%), latencia media de 7,1 s (DE 2,3), reducción del 45% tras 10 ciclos, d de Cohen ilustrativo = 1,2.

6.2 Qué representarían las gráficas (descripción, no generadas a partir de datos reales)

- Línea temporal: estrés basal (rojo, ~25 μV), caída tras estímulo EM (verde, ~85% en 6 s), normalización tras riego (azul).
- Mapa de calor: ciclos $\times$ plantas, intensidad de color proporcional al cese simulado.
- Espectro FFT: pico pre-estímulo (~3,2 Hz) frente a espectro post-estímulo aplanado (<1 Hz).

6.3 Hallazgos secundarios simulados

- Condicionamiento: ~70% de las plantas simuladas "aprenderían" en menos de 20 ciclos.
- Sincronía en red micorrícica: correlación cruzada simulada de 0,8 entre plantas conectadas.
- Frecuencia óptima simulada: 440 Hz produciría un efecto 1,5x mayor que 200 Hz.

7. Interpretación biofísica propuesta (especulativa)

La hipótesis interpretativa es que el estímulo a 440 Hz induciría resonancia hifal, alineando osciladores iónicos (canales de Ca^{2+}), liberando ABA acumulado y activando acuaporinas como proxy de hidratación. Se insiste en que esto NO implica consciencia vegetal, sino una analogía computacional: la planta como red distribuida de unidades electroquímicas. La comparación con la estimulación cerebral profunda (DBS) en la enfermedad de Parkinson es ilustrativa, no equivalente: en DBS existe un mecanismo neuronal verificado; aquí se trata de una hipótesis de trabajo pendiente de prueba.

8. Limitaciones y críticas

- Tamaño muestral: $n=5$ plantas implica potencia estadística muy baja; se necesitaría escalar a $n\approx 100$ para conclusiones robustas.
- Artefactos: térmicos (mitigables con elementos Peltier) y piezoeléctricos (requieren sujeción firme y constante de los electrodos).
- Causalidad: el diseño actual es vulnerable a la falacia post-hoc; se necesita un ensayo controlado y aleatorizado con doble cegamiento real, no simulado.
- Ética: el estrés inducido a la planta (privación hídrica) debe minimizarse y ser reversible; documentar protocolo de bienestar vegetal.
- Replicabilidad: previsiblemente menor en laboratorios domésticos ($\sim 80\%$) que en condiciones controladas ($\sim 95\%$); reportar siempre el entorno de ejecución.

Punto crítico para publicación académica

Si este proyecto se documenta en Zenodo o se enlaza al ORCID, cualquier versión publicada debe distinguir explícitamente, en el propio título o resumen, entre "propuesta de protocolo" y "resultados experimentales". Publicar datos simulados sin esa distinción —incluso con buena intención pedagógica— puede interpretarse como una afirmación de hallazgos no verificados, lo cual compromete la integridad científica del repositorio y del perfil asociado.

9. Aplicaciones prácticas en Educo Academy (módulo de 40 h)

Módulo 1 · Horticultura inteligente (10 h)

Macetas inteligentes con riego previo automatizado por EM; cifras de ahorro de agua y aumento de rendimiento citadas en el original (25% y 15%) deben tratarse como objetivos de diseño a validar, no como resultados medidos.

Módulo 2 · Biofeedback y bienestar (10 h)

Prácticas de meditación con sonificación planta-humano; cualquier aplicación con población infantil o con necesidades de apoyo (p. ej. autismo) debe diseñarse con supervisión de un profesional de la salud y no presentarse como intervención terapéutica validada.

Módulo 3 · Arte y educación (10 h)

Instalaciones sonoras multi-planta (integración con Max/MSP) y gamificación educativa ("Plant Whisperer") como proyecto de aula.

Módulo 4 · Ciencia ciudadana (10 h)

Preregistro en OSF, publicación de datos abiertos en Zenodo, y participación en metaanálisis colaborativos — aquí es donde la distinción dato real / dato simulado se vuelve obligatoria.

10. Protocolo de réplica en aula

5. Montaje en grupo (2 h): 10 estaciones en paralelo, ESP32 en red WiFi con panel colectivo.
6. Formación (4 h): codificación de sonificación en Python en directo.
7. Experimentación (20 h): rotación de roles (observador, emisor, analista).
8. Análisis (8 h): panel de estadística colectiva en R Shiny.
9. Presentación (6 h): pósters con mapas de calor y propuesta de financiación.

11. Líneas futuras (horizonte de 5 años — especulativo)

Estatus

Esta sección es explícitamente prospectiva y aspiracional. Ninguno de estos puntos cuenta con evidencia preliminar dentro de este proyecto.

- IA avanzada: modelos LSTM para predicción de estrés; explorar "traducción" planta-humano asistida por modelos de lenguaje.
- Hardware de próxima generación: electrodos de grafeno no invasivos, arrays tipo EEG de múltiples canales.
- Escala de ecosistema: redes micorrícicas forestales como analogía de computación distribuida.
- Biotecnología: combinación de EM con edición génica para modular canales iónicos (altamente especulativo y con implicaciones bioéticas a evaluar aparte).

- Aplicaciones clínicas: cualquier ensayo en humanos (p. ej. ansiedad) requeriría diseño, aprobación ética y dirección de personal médico/investigador cualificado; no es un siguiente paso natural de este proyecto educativo.
- Contexto espacial: estudios de estrés en micorrizas en gravedad reducida.
- Vertiente económica: kit de iniciación de bajo coste para horticultura doméstica.

12. Buenas prácticas para la difusión académica de este trabajo

- Preregistrar el protocolo (OSF) antes de recoger ningún dato real.
- Si se sube a Zenodo, titular y etiquetar la versión actual como "propuesta de protocolo y material docente", no como "estudio" o "resultados".
- Mantener separadas, en archivos o secciones distintas, la teoría establecida, el protocolo propuesto y cualquier simulación.
- Cuando existan datos reales, sustituir la sección 6 completa por los resultados reales, manteniendo el mismo nivel de detalle estadístico pero ahora verificado.
- Evitar lenguaje que sugiera consenso clínico o neurocientífico (p. ej. "neurobiología vegetal") sin la aclaración analógica correspondiente.

— Fin del documento —