

Química Analítica Sostenible en prácticas docentes: miniaturización, valorización de residuos y métricas verdes

Ballesteros Gómez, Ana María^a

^a Departamento de Química Analítica, Instituto Químico para la Energía y el Medioambiente (IQUEMA), Universidad de Córdoba, 14071 Córdoba, España (ana.ballesteros@uco.es)

Palabras clave: Prácticas, sostenibilidad, métricas verdes, residuos agroalimentarios, compuestos bioactivos

1. Introducción

Se propone una actualización de las prácticas tradicionales de análisis fotométrico de compuestos bioactivos mediante la incorporación de criterios de química analítica verde, miniaturización de procedimientos, reducción del consumo de reactivos y evaluación objetiva de la sostenibilidad mediante métricas específicas. El objetivo es que el alumnado no solo cuantifique polifenoles, flavonoides o carotenoides, sino que también aprenda a diseñar, comparar y justificar métodos analíticos más sostenibles, estableciendo una conexión directa entre la práctica de laboratorio, la valorización de subproductos agroalimentarios y los principios de la economía circular.

2. Diseño autónomo de la práctica guiado por criterios de sostenibilidad

El alumnado selecciona una matriz procedente de un residuo agroalimentario susceptible de valorización —por ejemplo, arándano, pimienta o jengibre— y compara distintos disolventes o mezclas de disolventes, incluyendo alternativas clasificadas como más verdes, para la extracción de compuestos bioactivos de biomasa vegetal. La práctica se plantea a microescala: se emplean únicamente 50 mg de muestra y una relación muestra:disolvente de 1:20 g:mL, equivalente a 1 mL de disolvente por extracción. Incluso realizando el procedimiento por triplicado y comparando dos disolventes, el volumen total de extracción se mantiene en torno a 6 mL, valor muy inferior al utilizado en protocolos convencionales de extracción sólido-líquido. Previamente, la muestra debe homogeneizarse mediante secado, trituración y tamizado, con el fin de mejorar la reproducibilidad del proceso extractivo. El análisis se lleva a cabo en microtubos Eppendorf de 2 mL, mediante etapas sencillas de agitación en vórtex y centrifugación. El empleo de materiales previamente caracterizados mediante un método convencional permite disponer de un valor de referencia para el contenido de compuestos bioactivos. Asimismo, la construcción de rectas de calibrado con patrones representativos, la expresión de los resultados en equivalentes del estándar por unidad de masa de muestra y la comparación estadística mediante test t y ANOVA garantizan el rigor analítico del procedimiento, aun trabajando a escala reducida.

Desde el punto de vista docente, la propuesta introduce una innovación relevante: el alumnado participa activamente en la toma de decisiones del método, seleccionando el residuo, justificando la elección de disolventes a partir de bibliografía científica y comparando su procedimiento con un protocolo convencional aportado por el profesorado. De este modo, la práctica deja de ser un protocolo cerrado y se transforma en una actividad basada en el diseño experimental, la interpretación crítica de resultados y la toma de decisiones fundamentadas.

La sostenibilidad se trabaja de forma explícita mediante la comparación de la eficiencia extractiva, la peligrosidad de los disolventes, el volumen consumido, los residuos generados, el consumo energético y la posible aplicabilidad industrial de los extractos obtenidos. Esta aproximación permite que el alumnado valore el método no solo por su capacidad para extraer los compuestos objetivo, sino también por el impacto ambiental asociado a la obtención del dato analítico.

3. Empleo de indicadores cuantitativos de sostenibilidad: métricas verdes

Un aspecto especialmente innovador es la incorporación de métricas verdes como indicadores cuantitativos de la sostenibilidad. En concreto, por su objetividad y sencillez en el cálculo y la disponibilidad de esta herramienta online gratuita, se ha aplicado el cálculo del pictograma **AGREEprep**, una métrica desarrollada específicamente para evaluar la sostenibilidad de la etapa de

preparación de muestra [1]. AGREEprep transforma distintos criterios de impacto en subpuntuaciones normalizadas de 0 a 1 y genera una puntuación global acompañada de un pictograma visual. Entre los criterios considerados se incluyen el tipo y volumen de disolvente, el consumo de reactivos y materiales, la generación de residuos, la cantidad de muestra, el número de etapas, el consumo energético, la seguridad del procedimiento, la automatización y el rendimiento de procesamiento. Esta herramienta convierte la sostenibilidad en un resultado cuantificable y comparable, evitando que quede limitada a una valoración meramente cualitativa (ver Figura 1).

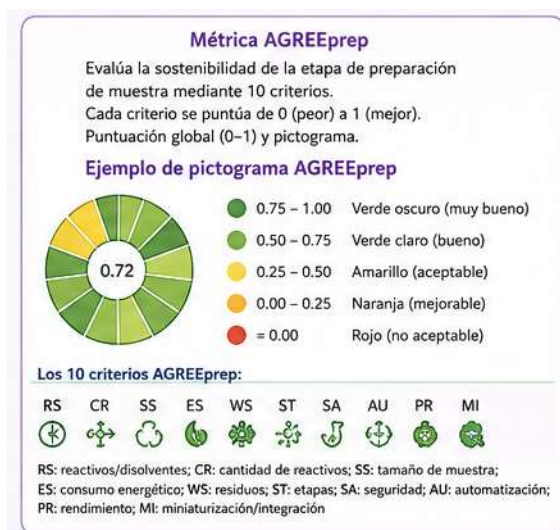


Figura 1. Métrica verde aplicable como indicador cuantitativo de sostenibilidad.

Además de AGREEprep, se pueden introducir métricas complementarias como AGREE, GAPI, Analytical Eco-Scale, AMVI o el enfoque RGB de la Química Analítica Blanca. Estas herramientas permiten que el alumnado evalúe la sostenibilidad desde distintas perspectivas: impacto ambiental, consumo de reactivos, generación de residuos, consumo energético, calidad analítica y aplicabilidad práctica del método.

Para la evaluación de la práctica se propone una presentación individual o en grupo, en la que el alumnado describirá el proceso analítico parcialmente diseñado durante la actividad. En dicho informe se deberá justificar, a partir de bibliografía científica, la elección de la matriz y los disolventes y las principales decisiones experimentales adoptadas. Además, el informe incluirá la discusión de los resultados analíticos obtenidos, así como la evaluación de la sostenibilidad del método mediante el cálculo del pictograma AGREEprep. De este modo, la evaluación integrará tanto el rigor analítico como la capacidad del estudiante para diseñar y justificar métodos más sostenibles.

Bibliografía

[1] Wojnowski, W.; Tobiszewski, M.; Pena-Pereira, F.; Psillakis, E. AGREEprep – Analytical greenness metric for sample preparation. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2022, 149, 116553. DOI: 10.1016/j.trac.2022.116553