

¿Qué tan verde es un experimento?

Marina L. Morales Galicia,¹ Joel O. Martínez,¹ Laura Bertha Reyes-Sánchez,¹ Osneski Martín Hernández,² Gabriel A. Arroyo Razo,¹ Adolfo Obaya Valdivia¹ y René Miranda Ruvalcaba¹

ABSTRACT (How green an experiment is?)

There are many publications pretending to belong to the green chemistry protocol; however, only few papers ask questions and make suggestions in order to obtain an appropriate evaluation about the green approach of a particular experiment. Thus, in this paper a contribution for an educative change is offered, searching for sustainability; the goal is to establish a model, in a critical way and under the green chemistry protocol: how green is a chemical experiment?

KEYWORDS: education, green approach, criteria, evaluation

Resumen

En muchos trabajos de investigación publicados se manifiesta que son verdes; sin embargo, hasta ahora pocos son en los que se cuestiona qué tanta es su incidencia en los planteamientos de la Química Verde, o en los cuales se proponga cómo evaluar ésta. Por ello, con la finalidad de contribuir a un cambio educativo que acerque a la química a la búsqueda cotidiana de la sostenibilidad, en este documento se presenta una propuesta para analizar de forma crítica y bajo el protocolo de la química verde, desarrollos experimentales, tanto de publicaciones en revistas indizadas, como de prácticas, ejercicios o proyectos educativos, con objeto de establecer criterios para determinar qué tan verde es un experimento o proceso.

El protocolo de la Química Verde no estipula un número mínimo de principios que deben satisfacerse para que un proceso, un producto químico o una reacción sean considerados como verdes, por lo que en este trabajo se presenta una propuesta innovadora de índices para evaluar el acercamiento verde de un desarrollo experimental. Para ejemplificar dicha sugerencia metodológica se presenta el análisis de tres trabajos diferentes.

Palabras clave: Educación, acercamiento verde, criterios, evaluación

Introducción

Día a día queda claro que resulta esencial procesar los alimentos y materias primas que los recursos naturales nos ofrecen, generar nuestros propios insumos y obtener así los satisfactores que el mercado demanda, mediante procesos amigables con el ambiente; es decir, que nos permitan disfrutar de ellos sin poner en riesgo su existencia (Reyes-Sánchez, 2006b).

Como parte de una estrategia de crecimiento real, en el mediano y largo plazo, es necesario no exportar materias pri-

mas, sino materiales procesados que nos permitan equilibrar la balanza económica y ejercer en los hechos, la soberanía sobre los valiosos recursos naturales que se poseen (Reyes-Sánchez, 2006a).

Uno de los posibles caminos hacia el logro de esos procesos amigables con el ambiente es la práctica de una química que permita encontrar rutas y realizar procesos que disminuyan el impacto negativo que, hasta ahora, se ha ejercido sobre el ambiente, premisa fundamental del desarrollo sostenible (*Ibid*).

Al respecto, cabe cuestionarse... desarrollo, ¿para quién? Esta pregunta, aparentemente sencilla, ha sido históricamente la gran olvidada en los modelos desarrollistas, más atentos al beneficio económico que a la distribución de la riqueza (Novo, 2006). Sin embargo, es preciso recordar que ya en el Informe Brundtland (UNESCO, 1987), se señalaba que “el desarrollo sostenible requiere la satisfacción de las necesidades básicas de todos, en particular las de los más pobres, a las que se deberá otorgar prioridad preponderante”, así como que el “desarrollo sostenible es aquel que garantiza las necesidades del presente sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”.

En ese sentido, una posible alternativa para crear una química que busca acercarse a la sostenibilidad mediante la práctica de procesos amigables con el ambiente y económicamente redituables, es la que corresponde a la Química Verde, planteamiento hecho por Anastas y Warner (1998). Sin embargo, el problema real es: ¿Cómo lograr transitar hacia esa química que busca acercarnos a la sostenibilidad, cuando ello implica un cambio que necesariamente afecta la forma de pensar, sentir y actuar?

En este punto, y frente a estas interrogantes, se hace necesario reflexionar acerca de la preservación de los recursos naturales no renovables en términos del tiempo de vida de los humanos, lo que depende no sólo del conocimiento, sino igualmente de la conciencia y cuidado que todos los profesionales de la química, y de toda ciencia, posean y pongan en práctica para generar esa alternativa, así como de la que los estudiantes de hoy, ciudadanos del mañana, puedan tener al respecto (Reyes-Sánchez, 2006a). Para lograrlo, será necesario

¹ Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Departamento de Química.

² Laboratorio de Síntesis Orgánica. Facultad de Química. Universidad de La Habana, Cuba.

voluntariamente, y a través del conocimiento y la continua reflexión, iniciar un proceso de transformación de la forma de pensar y actuar, pero sobre todo, de la manera de educar, e implica un cambio cualitativo e igualmente profundo en la enseñanza de las ciencias (Reyes-Sánchez, 2009).

Es entonces de especial interés que las prácticas, experimentos y proyectos que se diseñan, proponen, innovan y realizan en los laboratorios de docencia tengan un acercamiento cada vez más verde, y es con esta intención que en el presente trabajo se hace una propuesta metodológica de evaluación del acercamiento verde logrado en aquellos experimentos que dicen ser verdes —y que han sido publicados en diferentes revistas científicas o manuales experimentales—, con la finalidad de que este ejercicio educativo permita conocer y aplicar de forma crítica los 12 principios de la Química Verde. Así, esta propuesta es una forma de reflexión e interiorización del conocimiento científico que busca contribuir al análisis crítico de la información que se divulga y difunde, y a generar en estudiantes, docentes e investigadores una cultura química que busca en el plazo inmediato, la preservación de los recursos naturales del Planeta.

Antecedentes

La Química Verde es una filosofía de trabajo cuyo objetivo primordial es prevenir la contaminación, no remediarla: reducir al mínimo, o de ser posible eliminar por completo, la contaminación desde su inicio mediante el uso de procesos “limpios”, evitando al máximo el desperdicio o uso indiscriminado de materias primas no renovables, así como el empleo de materiales peligrosos o contaminantes en la elaboración de productos químicos que no atenten contra la salud o el ambiente. Los planteamientos de la Química Verde se regulan por un protocolo que consta de 12 principios que se presentan en la tabla 1 de forma resumida.

Es importante mencionar que el volumen 20 de la revista *Educación Química* (2009), fue dedicado en su totalidad a la Química Verde, y en ella pueden revisarse sus planteamientos y un amplio panorama de sus diversas aplicaciones. Gran cantidad de trabajos de investigación publicados pretenden ser verdes; sin embargo, hasta ahora existen pocos trabajos en que se cuestiona y se propone cómo evaluarlos para conocer: ¿cuándo estamos realmente haciendo Química Verde?, ¿cómo evaluar un desarrollo experimental y/o su correspondiente artículo publicado con respecto a su acercamiento verde?, ¿existe alguna metodología para ello?

En la literatura científica se encuentran diversos planteamientos al respecto, los que se centran fundamentalmente en la evaluación de los principios de economía atómica y eficiencia energética, entre ellos Trost (2002); sin embargo, hay otros autores con algunas diferencias en cuanto a planteamientos, perspectivas y tipo de parámetros a evaluar.

Por ejemplo, Constable *et al.* (2001 y 2002), desarrollaron desde una perspectiva industrial, una propuesta para evaluar cuantitativa y sistemáticamente si un proceso químico y/o una reacción química de síntesis orgánica, es o no ‘más verde’.

La idea fundamental es trabajar en la construcción —a corto, mediano y largo plazo—, de medidores de sostenibilidad tales como: intensidad de masa, energía, contaminantes y tóxicos. Estos autores conceden el mayor peso en el corto plazo, al uso y reutilización efectiva de los disolventes, como una vía para evaluar el peso del ciclo de vida, y reducir el impacto ambiental generado por los procesos químicos.

Van Aken *et al.* (2006) generaron una ecoescala semicuantitativa, que permite seleccionar la vía de síntesis orgánica más apropiada con base en parámetros económicos y ecológicos tales como rendimiento, costos, seguridad y condiciones y facilidad para efectuar la purificación del producto sintetizado, en tanto que Constable *et al.* (2001), se inclinan por la comparación directa del potencial de impacto ambiental de rutas alternativas para un compuesto particular, así como entre diferentes compuestos.

Tabla 1. Los 12 Principios de la Química Verde.

1. **Prevención:** es mejor prevenir la generación de un residuo, que tratarlo o eliminarlo después de haberlo generado.
2. **Economía atómica:** los métodos de síntesis deberán diseñarse de tal forma que se incorporen al máximo, en el producto final, todos los sustratos usados durante el proceso.
3. **Síntesis químicas menos peligrosas:** los métodos de síntesis deberán ser diseñados para utilizar y generar sustancias que presenten baja o nula toxicidad, tanto para el ser humano, como para el ambiente.
4. **Diseño de químicos seguros:** los productos químicos se diseñarán de manera que mantengan su eficacia y baja toxicidad.
5. **Uso de disolventes seguros o auxiliares:** evitar el empleo de sustancias auxiliares como disolventes, reactivos de separación, etc., y en el caso de que se empleen, éstos deberán ser lo más inocuos posible.
6. **Diseño de la eficiencia energética:** los requerimientos energéticos en un proceso químico se catalogan por su impacto económico y al medio ambiente; por lo tanto, se sugiere llevar a cabo los métodos de síntesis a temperatura y presión ambiente.
7. **Uso de materias primas renovables:** la materia prima debe ser preferiblemente renovable en lugar de agotable, siempre que sea técnica y económicamente viable.
8. **Reducir derivados:** evitar el uso de grupos de bloqueo, de protección-desprotección o la modificación temporal de los procesos fisicoquímicos, su empleo requiere reactivos adicionales y genera residuos.
9. **Catálisis:** considerar el empleo de catalizadores, lo más selectivos posible, de preferencia de origen natural.
10. **Diseñar sustancias biodegradables:** los productos deberán ser diseñados de tal manera que al final de su vida útil no persistan en el ambiente.
11. **Análisis en tiempo real para prevenir la contaminación:** las metodologías analíticas necesarias serán desarrolladas en el momento del proceso, lo que permitirá un seguimiento y control en tiempo real del proceso, previo a la formación de sustancias peligrosas.
12. **Químicos seguros para prevenir accidentes:** las sustancias y la forma de una sustancia usada en un proceso químico deberá ser elegida para reducir el riesgo de accidentes químicos, incluyendo las emanaciones, explosiones e incendios.

En Miranda *et al.* (2003), como consecuencia de un trabajo de Anastas *et al.* (2001), se resumen los esfuerzos realizados en el periodo 1981 a 2003, para hacer de la Química Verde una línea de trabajo científicamente fructífera, lo que finalmente se reconoció por medio de la apertura del Seminario de Química Verde que forma parte del Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Químicas de la Universidad Nacional Autónoma de México.

En consecuencia, con esta propuesta se elige la vía educativa de formación de una conciencia colectiva para impulsar y generar un cambio cultural al interior de la Ciencia y que desde ella se decante a la ciudadanía. Se opta por promover en todos los niveles educativos una metodología dirigida a la construcción y apropiación³ del conocimiento, con la finalidad de inducir la formación de una cultura de respeto al ambiente, e impulsar una actitud científica que transite hacia la sostenibilidad, mediante el análisis crítico y cotidiano del cumplimiento del mayor número posible de los 12 principios de la Química Verde —o mayor “acercamiento verde”⁴—, en todo proceso. Como producto de este trabajo de equipo y, con una intención educativa, se propone una alternativa que busca contribuir a la construcción de una metodología de evaluación que nos permita discernir cuándo estamos realmente haciendo Química Verde y, por ende, qué tan verde es el proceso experimental realizado.

Propuesta de evaluación del acercamiento verde

Con la finalidad de contribuir al cambio educativo que favorezca la búsqueda cotidiana de la sostenibilidad y teniendo en consideración los 12 principios de la Química Verde, las diferentes áreas en las que ésta aplica y la necesidad de implementar todo un enfoque dentro de la Química —cuyo objetivo es, como ya se dijo antes, el prevenir o minimizar la contaminación desde su origen—, tanto a nivel industrial como en los laboratorios de investigación y docencia, se propone evaluar qué tanto acercamiento verde tiene un método experimental, desde el ámbito educativo. Esta evaluación implica un proceso de análisis, crítica y propuesta que permita construir y formar en los estudiantes de todo nivel —ciudadanos y científicos de mañana—, tanto los conocimientos como los valores (Gómez, 2004) que los consoliden como profesionales capaces de instituir y practicar una química que contribuya a la conservación de los recursos naturales del planeta.

³ Proceso cognitivo metodológico por medio del cual el individuo logra hacer propios los conocimientos de forma tal que los reorganiza, los transforma, construye nuevos nexos con la práctica y los adapta a los contextos de actuación y aplicación; en suma, logra una comprensión de conceptos de mayor complejidad (Reyes-Sánchez, 2009).

⁴ En la literatura científica en idioma inglés, sobre el tema de química verde, se acostumbra utilizar el término *green approach*, el cual se refiere a qué tanto un proceso o experimento cumple con el PROTOCOLO VERDE.

El objetivo particular de la propuesta metodológica de evaluación del acercamiento verde que aquí se hace es generar en el alumno, el investigador y el docente la conciencia sobre su poder de decisión, ya que puede optar por la realización de procesos que dañan al ambiente o prevenir su contaminación mediante las modificaciones necesarias para minimizar y, si es posible, eliminar tanto la generación de residuos y efluentes, como la utilización de sustancias tóxicas en todo proceso de síntesis de compuestos químicos.

Metodología desarrollada y forma de evaluación que se propone

En primera instancia, para realizar la evaluación del proceso experimental de un trabajo o publicación que dice ser verde, es necesario conocer con profundidad los 12 principios de la Química Verde y sus implicaciones, por lo que se debe partir del conocimiento fundamentado en la revisión, discusión, análisis y ejemplificación de estos principios. Se espera entonces que no sólo se comprendan dichos conocimientos y conceptos, sino que se logre una apropiación de los mismos, que permita su aplicación en el ejercicio cotidiano de la actividad profesional.

Asimismo, se enfatiza que en relación al protocolo de la Química Verde no está estipulado un número mínimo de principios que deberían cubrirse para que un proceso, un producto químico o una reacción sean considerados como verdes.

Para llevar a cabo la evaluación se seleccionaron trabajos de la literatura que permitieran proponer de forma descriptiva una metodología para evaluar qué tanto es el acercamiento verde de un experimento. Al respecto, es importante aclarar que la información contenida en los documentos analizados es responsabilidad de los autores y que el análisis del proceso realizado para su evaluación mediante la metodología que se propone, se hizo en función de la descripción incluida en la sección experimental de cada artículo o trabajo seleccionado.

El análisis se efectúa en relación al cumplimiento de los principios de la Química Verde. La herramienta metodológica que se propone es mixta: cualitativa, mediante un código de color (figura 1) y semicuantitativa, a través del uso de una escala numérica tipo Likert⁵ (1–10), evaluaciones que se ha considerado adecuado indicar entre paréntesis. La herramienta de evaluación incluye entonces el código de colores y la escala tipo Likert que va de totalmente café (1) a totalmente verde (10), y que de manera ponderal indica cuál es el grado de acercamiento al protocolo de la Química Verde, como puede observarse en la figura 1.

Para una mejor evaluación de los trabajos, y mayor comprensión del significado de los principios de la Química Verde, se propone hacer el diagrama de flujo de la sección o método experimental de cada uno de los artículos o trabajos

⁵ Es una escala ordinal que permite ordenar datos en categorías, con objeto de medir una respuesta referente a niveles diferentes de conocimientos, habilidades y/o experiencias.

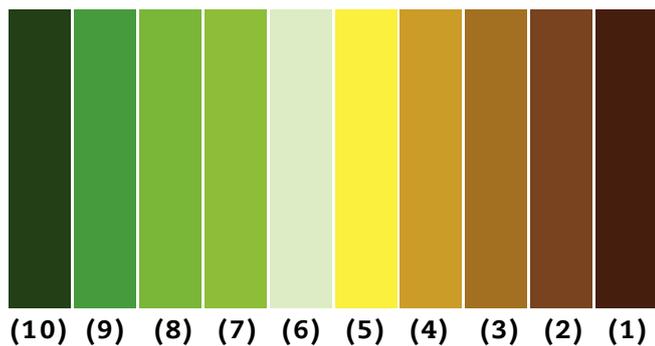


Figura 1. Código de color para evaluar un acercamiento verde: 10, completamente verde, 1 totalmente café.

científicos que se van a evaluar, incluyendo pictogramas de los reactivos y disolventes, mostrando qué principio de la Química Verde se está evaluando, qué tan verde o café es su aplicación o incidencia en la escala del 1 al 10 conforme a la tabla 2, y para otorgar una calificación se debe tomar en cuenta la participación de lo que se está analizando en la reacción y cuál es el daño y/o riesgo que esto representa para el ambiente.

El análisis y la evaluación se estructura considerando los aspectos enunciados en la tabla 3, en tanto que los *pasos metodológicos para realizar la evaluación*, se presentan en la tabla 4 y el significado de los pictogramas en la tabla 5.

Finalmente se espera que a través de esta metodología, no sólo se evalúe qué tan verde es un experimento, sino también que el usuario se juzgue a sí mismo desde la perspectiva educativa, en cuanto al logro de la comprensión y nivel de apropiación de los principios de la Química Verde, además de que se construyan conocimientos y se propicie la concientización del individuo acerca de su actuación e influencia sobre el medio.

Es conveniente mencionar que después de una profunda revisión en la literatura no se encontró ningún documento, desde el surgimiento de la Química Verde en 1990-91 (Compilador: Miranda, 2010), que haga una propuesta desde la perspectiva educativa para evaluar qué tan verde es un proceso o experimento, y mucho menos una herramienta metodológica que la apoye.

Como ejemplo de la metodología propuesta, y para su mejor comprensión, se presentan ejemplos de su aplicación; dos

Tabla 2. Escala de análisis y evaluación.

	(10)	Totalmente verde
	(9)	Gran acercamiento verde
	(8)	Muy buen acercamiento verde
	(7)	Buen acercamiento verde
	(6)	Ligero acercamiento verde
	(5)	Transición café a verde
	(4)	Ligeramente café
	(3)	Medianamente café
	(2)	Muy café
	(1)	Totalmente café

Tabla 3. Elementos para análisis y evaluación.

Título, autores, nombre de la revista, año y página inicial (en el idioma original).
Resumen (abstract) en el idioma original.
Resumen en el contexto verde.
Diagrama de flujo experimental.
Evaluación del acercamiento verde del proceso: a) para cada paso y b) sumativa.

de ellos están basados en prácticas de laboratorio para la síntesis de Aspirina®, y el tercero, analiza un artículo publicado. Para cada uno de ellos se muestra el diagrama de flujo experimental, incluyendo los pictogramas que indican el tipo de daño y/o riesgo que pueden representar al ambiente los reactivos y disolventes utilizados.

Cabe mencionar que la evaluación final de los procesos analizados no es un promedio numérico estricto del cumplimiento de los 12 principios para el total de los pasos experimentales, sino que ésta se efectúa en función del conocimiento químico y el criterio que tiene como base la experiencia que permite a los profesionales de esta ciencia, ante todo la

Tabla 4. Pasos metodológicos para realizar la evaluación.

1. Leer el documento a evaluar, para lograr la mayor comprensión posible de éste.
2. Colocar tal y como aparecen en la publicación, el título, autores, año, nombre de la revista, volumen, página inicial y resumen.
3. Elaborar un resumen en el contexto verde del trabajo en cuestión.
4. Dibujar la reacción general del proceso.
5. Construir un diagrama de flujo del método experimental, correspondiente al artículo o trabajo científico por evaluar asignando a cada etapa una letra en minúscula y orden alfabético consecutivo.
6. Colocar para cada etapa experimental un cuadro conteniendo un número que indique el principio que se abarca y evaluar, mediante el código de color propuesto en la figura 1, el grado de acercamiento verde (color-tono) de éstas, lo cual se complementa con la evaluación indicada entre paréntesis.
7. Incluir los pictogramas correspondientes a la toxicidad, inflamabilidad, corrosión y daño al medio ambiente, de los reactivos, disolventes, productos y residuos generados para lo cual se debe tener conocimiento de las propiedades físicas, químicas y toxicológicas de todos ellos para cada paso del desarrollo experimental.
8. Elaborar una tabla mostrando el orden en el cual aparecen cada uno de los pasos experimentales en el diagrama de flujo, la evaluación justificada en los 12 Principios de la Química Verde que se hace para cada paso del proceso.
9. Realizar la evaluación sumativa fundamentada del acercamiento verde del proceso; es decir, explicar por qué se considera que se cumplieron o no determinados principios de la Química Verde.
10. Presentar al final del diagrama de flujo experimental, la escala tipo Likert de asignación numérica y de color correspondiente, la cual se determina mediante la sumatoria de las evaluaciones realizadas, la cual se divide entre el total de eventos analizados.

Tabla 5. Pictogramas.

		
Veneno	Inflamable	Corrosivo
		
Nocivo	Irritante	Daña al ambiente

comprensión profunda de los principios de la química verde, para así aplicarlos de forma analítica y acorde a esta filosofía de trabajo.

Aplicación de la metodología de evaluación del acercamiento verde que se propone

Ejemplo 1.

“Práctica de Laboratorio: Obtención de Aspirina® (ácido acetilsalicílico)” (figura 2).

Abstract: No contiene.

Resumen en el contexto verde: Es importante resaltar que este proceso no indica ser verde. En él se describe la obtención de ácido acetilsalicílico mediante la reacción del ácido *ortho*-hidroxibenzoico (salicílico) y anhídrido acético en presencia catalítica de ácido sulfúrico, sin disolvente.

Evaluación del acercamiento verde del proceso del ejemplo 1: Siguiendo los pasos, conforme al diagrama de flujo (figura 3), se presenta a continuación la evaluación del proceso en la tabla 6.

Evaluación final del ejemplo 1: Ésta se determina mediante la sumatoria de todas las evaluaciones realizadas (98) la cual se divide entre el total de eventos analizados (16), obteniendo de esta forma la evaluación correspondiente para este proceso, el cual se considera con un ligero acercamiento verde (6).

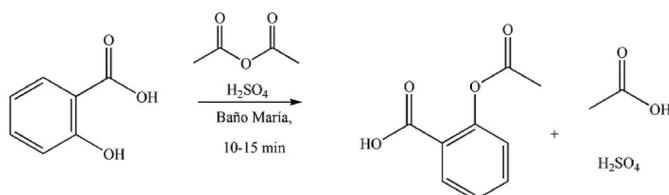


Figura 2. Reacción de obtención de ácido acetilsalicílico.

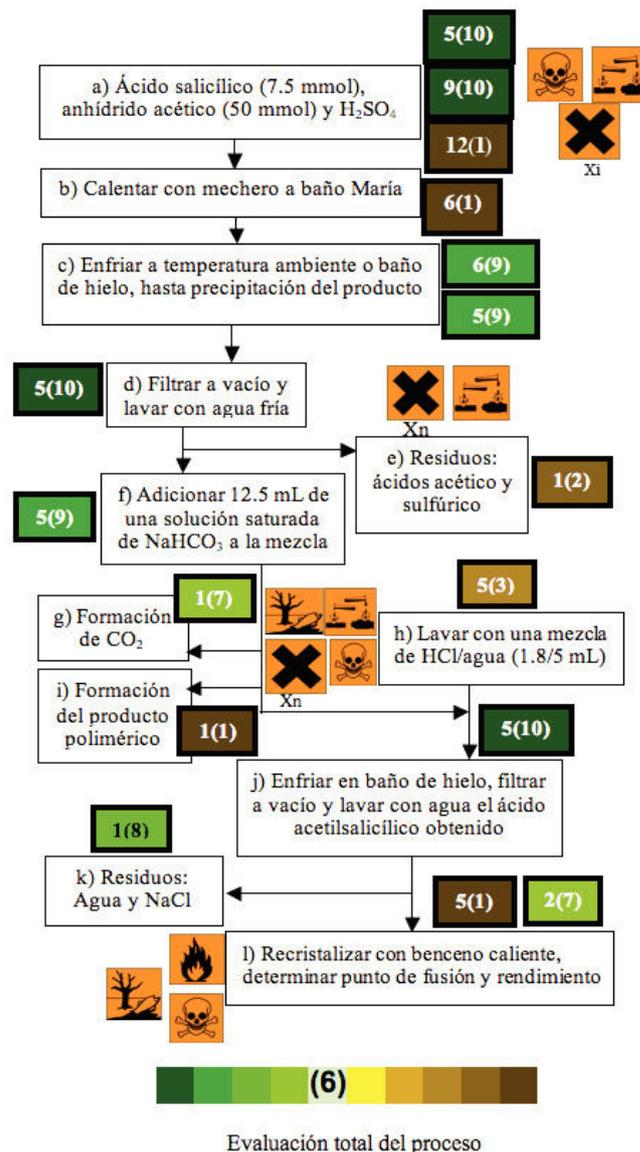


Figura 3. Diagrama de flujo del ejemplo 1.

Ejemplo 2

“Síntesis de Aspirina®”. G. Arroyo, E. Hernández, J. Martínez, R. Miranda, M. Noguez, G. Penieros C., Rivero, B. Velasco, M. Vilchis, C. Gómez. *Prácticas de Laboratorio de Química Orgánica Verde*. Primera edición. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2010, pp. 79-83 (figura 4).

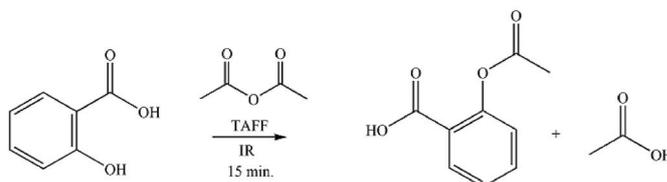


Figura 4. Síntesis alterna para obtención de ácido acetilsalicílico.

Tabla 6: Evaluación del ejemplo 1.

Paso a	Se emplea un catalizador (H_2SO_4) por lo que este punto se considera oportuno evaluar al principio 9 como totalmente verde (10); sin embargo, dado que el catalizador es dañino es adecuado calificar al principio 12 como totalmente café (1). Además, como no se emplea disolvente, este paso es totalmente verde (10) con respecto al principio 5.
Paso b	El calentamiento se lleva a cabo empleando gas licuado comercial, por lo cual el acercamiento al principio 6 se considera totalmente café (1), ya que existen y se deben preferir otras fuentes de activación.
Paso c	El enfriamiento se realiza a temperatura ambiente o mediante baño de hielo, por lo que este paso es adecuado evaluarlo con gran acercamiento verde (9) en cuanto a los principios 6 y 5.
Paso d	Para la filtración y lavado del compuesto de interés se emplea agua, disolvente considerado verde por excelencia (Anastas y Warner, 1998); sin embargo, se deben considerar los residuos generados. En consecuencia, este paso es conveniente calificarlo como totalmente verde (10) en relación al principio 5.
Paso e	Se generan los residuos ácido acético ^a y ácido sulfúrico, lo que permite evaluar a este paso con respecto al principio 1 como muy café (2).
Paso f	Para complementar la purificación del compuesto de interés se emplea una solución de $NaHCO_3$ saturada en agua, disolvente verde (Anastas y Warner, 1998). En consecuencia, hay un gran acercamiento verde (9) con relación al principio 5.
Paso g	Se generan CO_2 y acetato de sodio, al emplear en el paso anterior $NaHCO_3$, el que de acuerdo con Anastas y Warner es considerado como una fuente renovable ^b por lo tanto, en función de la dualidad residual se aprecia un buen acercamiento verde (7) con respecto al principio 1 (Anastas y Warner, 1998).
Paso h	Se hace uso de ácido clorhídrico en mezcla acuosa, el cual es nocivo, tóxico y corrosivo tanto para el ser humano como para la naturaleza, por lo que se sugiere una evaluación medianamente café (3) del principio 5.
Paso i	Se genera un producto polimérico, por lo que es apropiado calificar a este paso en su acercamiento al principio 1 como totalmente café (1).
Paso j	Para concluir la purificación del compuesto de interés, se emplea baño de hielo y agua, disolvente verde (Anastas y Warner, 1998). En consecuencia, este paso es totalmente verde (10) respecto al principio 5.
Paso k	Como residuos se generan $NaCl$ y agua, por lo que es conveniente evaluar con un muy buen acercamiento verde (8) al principio 1.
Paso l	Con relación al principio 2, hay buena economía atómica (Lancaster, 2002) (75.06%). Este paso tiene un buen acercamiento verde (7); no obstante, se recrystaliza con benceno, que es inflamable y muy tóxico, conforme al principio 5 es totalmente café (1).

(a) De acuerdo a la lista TRI (*Toxics Release Inventory*) de la EPA del año 2009, el ácido acético no es considerado como material tóxico al ser emitido al medio ambiente.

(b) El CO_2 es un gas que forma parte del ciclo biogeoquímico del carbono, y como tal, la naturaleza siempre lo ha reabsorbido a través de los sistemas océano-pedósfera-atmósfera en que habitamos los seres vivos, manteniendo un equilibrio natural; el problema es que su liberación a la atmósfera por acciones antropocéntricas ha excedido dicha capacidad, razón por la cual se requiere del control de dichas emisiones. En el contexto verde, las concentraciones de CO_2 liberadas son en microescala.

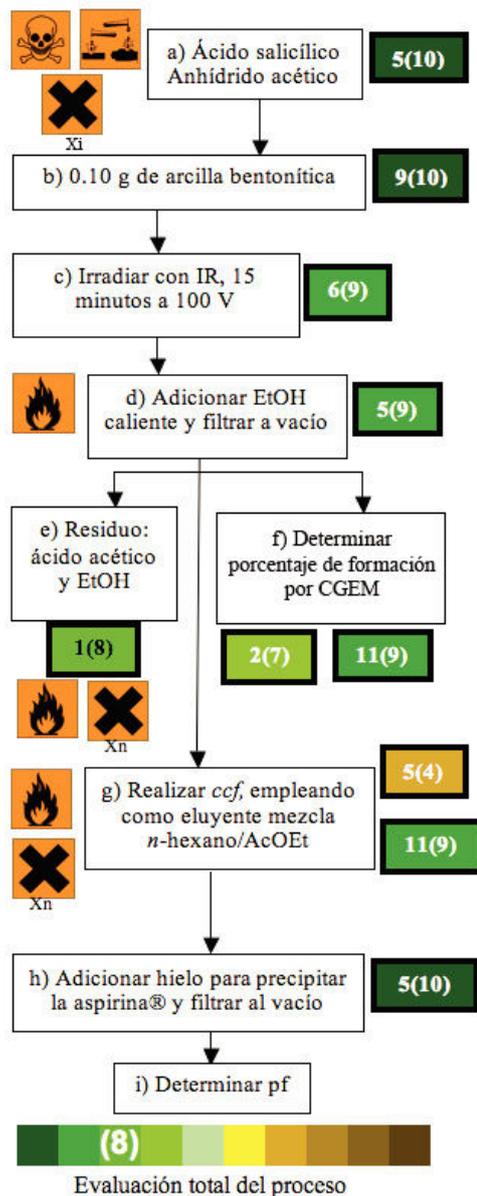


Figura 5. Diagrama de flujo del ejemplo 2.

Abstract: No contiene.

Resumen en el contexto verde: Se describe una alternativa sintética para obtener Aspirina®, mediante un acercamiento verde ambientalmente benigno, utilizando como catalizador y/o medio de reacción Tonsil Actisil FF (arcilla bentonítica), en condiciones libres de disolvente y usando como fuente de activación alterna, irradiación infrarroja (figura 4).

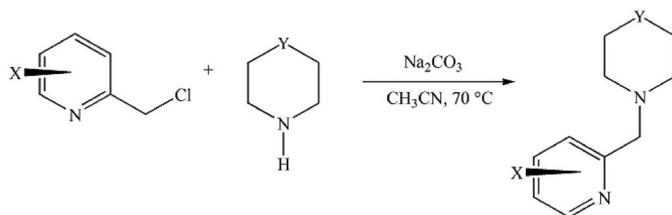
Evaluación del acercamiento verde del proceso del ejemplo 2: Siguiendo el orden conforme al diagrama de flujo, se presenta la evaluación en la tabla 7.

Tabla 7. Evaluación del ejemplo 2.

Paso a	No se emplea disolvente, por lo que este paso es totalmente verde (10) con relación al principio 5.
Paso b	Al emplear una arcilla natural como catalizador de la reacción, se evitó el uso de H ₂ SO ₄ ; en consecuencia, en este paso, en cuanto al principio 9, es también totalmente verde (10).
Paso c	El proceso presenta un gasto energético de 62.5 Wh mediante el empleo de irradiaciones infrarrojas, el cual es un método de activación más seguro que el uso de gas licuado, por lo que este paso es oportuno considerarlo con un gran acercamiento verde (9) con respecto al principio 6.
Paso d	Se emplea etanol ^a caliente para el lavado del compuesto de interés, el cual, a pesar de ser un disolvente inflamable, es considerado verde en función de su baja toxicidad y buena degradabilidad. Por ello, se puede considerar que este paso presenta un gran acercamiento verde (9) en cuanto al principio 5.
Paso e	Se genera ácido acético que es biodegradable y poco tóxico, al igual que el etanol, por lo que es propicio evaluar esta etapa con un muy buen acercamiento verde (8) respecto al principio 1, ya que también se trabaja a nivel microescala.
Paso f	La economía atómica (Lancaster, 2002) es de 75.06%, lo que implica que se considere, para el principio 2, un buen acercamiento verde (7). Asimismo, dado que el seguimiento de la reacción se puede efectuar por CGEM (cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas), es conveniente evaluar la incidencia del principio 11 con gran acercamiento verde (9).
Paso g	El seguimiento de la reacción también se puede llevar a cabo mediante CCF (cromatografía en capa fina), lo cual califica al proceso en cuanto al principio 11 con gran acercamiento verde (9); sin embargo, dado que se emplean AcOEt (acetato de etilo) y <i>n</i> -hexano (este último considerado como disolvente café), pero en pequeñas cantidades, es pertinente calificar este paso respecto al principio 5 como ligeramente café (4).
Paso h	Para concluir la purificación del compuesto de interés se emplea agua de hielo, innegablemente verde, lo que evalúa este paso como totalmente verde (10) en cuanto al principio 5.
Paso i	Sólo se determina pf (punto de fusión), actividad para la que puede considerarse que no es aplicable ningún principio.

(a) De acuerdo a la lista TRI (*Toxics Release Inventory*) de la EPA del año 2009, el etanol, el ácido acético y el acetato de etilo no son considerados como materiales tóxicos al ser emitidos al medio ambiente.

Evaluación final del ejemplo 2: Ésta también se determina mediante la sumatoria de todas las evaluaciones realizadas (85) la cual se divide entre el total de eventos realizados (10); es conveniente hacer notar que las cantidades empleadas en este proceso son muy pequeñas, ubicándolo por ello dentro de la microescala; por todo lo anterior la evaluación respectiva para este proceso corresponde a un muy buen acercamiento verde (8).

**Figura 6.** Síntesis de piperidonas N-sustituidas.

Ejemplo 3

“Green Chemistry Approach to the Synthesis of *N*-Substituted Piperidones”. Margaret M. Faul, Michael E. Kobierski and Michael E. Kopach, *J. Org. Chem.*, **68**, 5739, 2003 (figura 6).

Abstract: An efficient green chemistry approach to the synthesis of *N*-substituted piperidones and piperidines was developed and applied to the synthesis of 1-(2-pyridinylmethyl)piperidin-4-one, **1**, a key starting material for the synthesis of LY317615, an antiangiogenic agent currently under development at Eli Lilly and Company. The general utility of this methodology, which presents significant advantages over the classical Dieckman approach to this class of compounds, was also demonstrated by direct synthesis of a series of substituted piperidones and piperidines, including potential dopamine D4 receptor antagonists, that have been evaluated in the clinic as antipsychotic agents.

Resumen en el contexto verde: Se describe la síntesis, de una serie homóloga de piperidonas *N*-sustituidas, la cual se considera que procede con un gran acercamiento verde en función de la economía atómica que se reporta, que se realiza en un solo paso, con buen rendimiento, bajo condiciones básicas suaves; empleando calentamiento térmico tradicional, en presencia de acetonitrilo, un disolvente café, entre otros. .

Evaluación del acercamiento verde del proceso del ejemplo 3: Siguiendo el orden conforme al diagrama de flujo, se presenta la evaluación en la tabla 8.

Evaluación final del ejemplo 3: Ésta se determina con un criterio análogo al realizado con los ejemplos uno y dos (51/11) correspondiéndole a este proceso, una evaluación ligeramente café (4).

Conclusiones

La formación de futuros científicos y docentes, es un proceso que se cumple en diversos plazos y múltiples niveles, más aún cuando se busca que ellos cambien su forma de pensar y actuar hacia el ambiente de manera cognitivamente fundamentada, a través no sólo de la introducción de las modificaciones necesarias para minimizar y evitar la generación de residuos y efluentes contaminados, y la utilización de sustancias tóxicas en los procesos de síntesis de sustancias químicas, sino más

Tabla 8. Evaluación del ejemplo 3.

Paso a	El empleo de acetonitrilo, que es cancerígeno, no es recomendable, disolvente café. Por ello es satisfactorio que este paso se califique como totalmente café (1) conforme al principio 5. Además, dadas las características tóxicas del sustrato y del reactivo, este paso es apropiado evaluarlo como muy café (2) en función del principio 12.
Paso b	El empleo de Na_2CO_3 en polvo, con el que se reemplazó a la piridina usada como reactivo básico en otros métodos (Kuehne y Muth, 1991), permite evaluar el principio 12, con un gran acercamiento verde (9).
Paso c	No aplica un buen diseño de la eficiencia energética, ya que no se realiza el proceso con un método adecuado de activación de la reacción. Debido a que se emplean condiciones térmicas por tiempos prolongados, este paso, con respecto al principio 6, se aprecia como medianamente café (3).
Paso d	Aun cuando se genera HCl, un subproducto peligroso, es neutralizado <i>in situ</i> por el carbonato de sodio, formándose NaCl, H_2O y CO_2 , moléculas que si bien son residuales se consideran como verdes (Anastas y Warner, 1998); esta dualidad residuo-verde permite a esta parte del proceso considerarla con un ligero acercamiento verde (6) con respecto al principio 1.
Paso e	El seguimiento de la reacción se lleva a cabo mediante CCF, lo cual califica al proceso en cuanto al principio 11 con un gran acercamiento verde (9); sin embargo, dado que se emplean metanol y diclorometano (considerados como disolventes cafés) es oportuno evaluar a este paso respecto al principio 5 como totalmente café (1).
Paso f	El enfriamiento se realiza a temperatura ambiente, por lo que este paso es apropiado evaluarlo como totalmente verde (10) con respecto al principio 6; sin embargo, dado que se emplea acetonitrilo para lavar el producto, esto da pauta para que este paso se catalogue, conforme al principio 5, como totalmente café (1).
Paso g	Para la etapa de purificación se emplean metanol y diclorometano, disolventes cafés, lo que indicaría que este paso se evaluara como totalmente café; sin embargo, dado que las cantidades aplicadas son mínimas, es propicio y adecuado reconsiderar calificarla, con respecto al principio 5, como medianamente café (3). Con relación al principio 2, hay una muy buena economía atómica (84.07%) (Lancaster 2002), este paso presenta un muy buen acercamiento verde (8).

importante aún, impulsando desde el aula, y mediante el continuo análisis y reflexión de la práctica cotidiana, la construcción de los valores que les permitan hacer realidad un cambio cultural que se refleje en su práctica profesional, cualquiera que sea el camino que posteriormente sigan.

Para realizar esta labor y avanzar en el sentido antes indicado, se propuso el empleo de una herramienta metodológica mixta: cualitativa, mediante un *código de color* y semicuantitativa, a través del uso de una *escala numérica* tipo Likert, que permite evaluar qué tan verde es un proceso, con fundamento en los 12 principios de la Química Verde.

Se aporta una metodología procesual que permite revisar

paso a paso, los principios de la Química Verde que se cumplen o no en cada etapa de un proceso de síntesis, aislamiento y purificación de un producto, y se proponen los índices (entre paréntesis) para hacerlo. La evaluación final de los procesos analizados es consecuencia de la comprensión profunda de los 12 principios para el total de los pasos experimentales, y como consecuencia se efectúa el promedio numérico de la incidencia de éstos.

Finalmente, se contribuye a la construcción de una química cuyo objetivo es aproximarse a la sostenibilidad, e incentivar al lector hacia la docencia y la investigación mediante el ejercicio didáctico continuo, además de impulsar la formación de principios ciudadanos colectivos que coadyuven en el mediano y largo plazo, tanto a garantizar la existencia de la vida en la Tierra, como a que ésta sea socialmente más equitativa para las generaciones futuras.

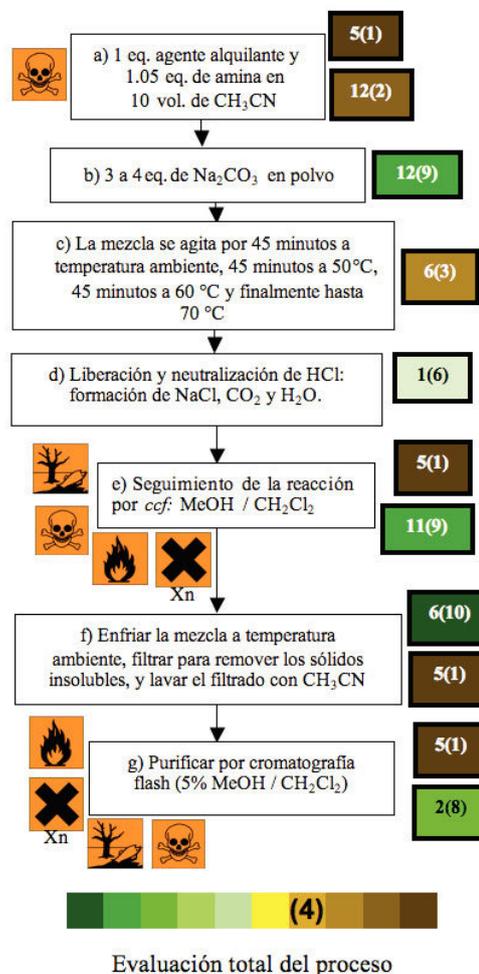


Figura 7. Diagrama de flujo del ejemplo 3.

Referencias

- Anastas, P. T., Kirchoff, M. M., Williamson, T. C. Catalysis as a foundational pillar of green chemistry, *Applied Catalysis A: General*, **221**, 3-13, 2001.
- Anastas, P. T., Warner, J. C. *Green Chemistry: theory and practice*. New York: Oxford University Press, 1998.
- Constable, D. J. C., Curzons, A. D., Freitas dos Santos, L. M., Geen, G. R., Hannah, R. E., Hayler, J. D., Kitteringham, J., McGuire, M. A., Richardson, J. E., Smith, P., Webb, R. L., Yu, M. Green chemistry measures for process research and development, *Green Chem.*, **3**, 7-9, 2001.
- Constable, D. J. C., Curzons, A. D., Cunningham, V. L. Metrics to 'green' chemistry—which are the best? *Green Chem.*, **4**, 521-527, 2002.
- Gómez, M. M., Reyes-Sánchez, L. B. La educación ambiental, imprescindible en la formación de las nuevas generaciones, *Terra Latinoamericana*, **22**, 515-522, 2004.
- Kuehne, M. E., Muth, R. S. Total syntheses of yohimbe alkaloids, with stereoselection for the normal, allo, and 3-epiallo series, based on annulations of 4-methoxy-1,2-dihydropyridones, *J. Org. Chem.*, **56**, 2701-2712, 1991.
- Kuehne, M. E., Matson, P. A., Bornmann, W. G. Enantioselective syntheses of vinblastine, leurosidine, vincovaline and 20'-epi-vincovaline, *J. Org. Chem.*, **56**, 513-528, 1991.
- Lancaster, M. *Green Chemistry: an Introductory text*, UK, RSC, Cambridge, 2002.
- Miranda, R., Arroyo, G., Penieres, G., Delgado, F., Cabrera, A., Álvarez, C., Salmón, M., Preparative heterocyclic chemistry using Tonsil a bentonitic clay; 1981 to 2003, *Research Trends*, **9**, 195-235, 2003.
- Miranda, R. (compilador): Arroyo, G., Hernández, E., Martínez, J., Miranda, R., Noguez, M., Penieres, J., Rivero, C., Velasco, B., Vilchis, M., Gómez, C. *Prácticas de Laboratorio de Química Orgánica Verde*, Primera edición. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2010, pp. 79-83.
- Novo, M. *El desarrollo sostenible. Su dimensión ambiental y educativa*, Pearson Prentice Hall. UNESCO, 2006.
- Reyes-Sánchez, L. B., La enseñanza de la ciencia del suelo en el contexto del desarrollo sostenible, *Terra Latinoamericana*, **24**, 431-439, 2006a.
- Reyes-Sánchez, L. B., Canicas, lombrices, arcillas y cuentos en la construcción de un nuevo paradigma en la enseñanza de la Ciencia del Suelo, *Terra Latinoamericana*, **24**, 565-574, 2006b.
- Reyes-Sánchez, L. B. *Propuesta interdisciplinaria de enseñanza y aprendizaje de las ciencias de orden ambiental para la educación básica; utilizando el suelo como recurso*, Tesis Doctoral, ITCR-UNAM, 2009.
- Revista *Educación Química*. De aniversario: química verde. *Educ. quím.*, **20**, 394-446, 2009.
- Trost, B. M. On Inventing Reactions for Atom Economy, *Acc. Chem. Res.*, **35**, 695-705, 2002.
- UNESCO, *International Congress on Environmental Education and Training*, Moscú/París, 1987.
- Van Aken, K., Strekowski, L., Patiny, L. EcoScale, a semi-quantitative tool to select an organic preparation based on economical and ecological parameters, *Beilstein Journal of Organic Chemistry*, **2**, 2006.