



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE

Centro de Políticas Públicas UC

Química Verde y políticas públicas: actualidad, desafíos y propuestas para un futuro sustentable

FLAVIA ZACCONI

Facultad de Química y de Farmacia UC e
Instituto de Ingeniería Biológica y Médica UC

CLAUDIA PABÓN

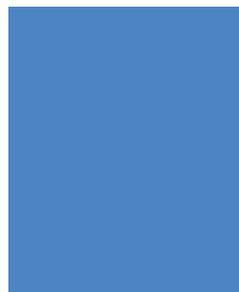
Escuela de Administración UC e
Instituto para el Desarrollo Sustentable UC

FRANCISCO GALLEGO

Instituto de Economía UC e
Instituto para el Desarrollo Sustentable UC

LARS RATJEN

Center for Green Chemistry and
Green Engineering, Yale University



TEMAS DE LA AGENDA PÚBLICA

Año 19 / N° 179 / Noviembre 2024

ISSN 0718-9745

Química Verde y políticas públicas: actualidad, desafíos y propuestas para un futuro sustentable

FLAVIA ZACCONI

Facultad de Química y de Farmacia UC e
Instituto de Ingeniería Biológica y Médica UC

FRANCISCO GALLEGO

Instituto de Economía UC e
Instituto para el Desarrollo Sustentable UC

CLAUDIA PABÓN

Escuela de Administración UC e
Instituto para el Desarrollo Sustentable UC

LARS RATJEN

Center for Green Chemistry and
Green Engineering, Yale University

1. Introducción al concepto de Química Verde (QV)

Este documento presenta un análisis pionero sobre la integración de la Química Verde en las políticas públicas en Chile, destacando su importancia como una herramienta clave para promover la sostenibilidad en el país. A medida que los desafíos ambientales se vuelven más críticos a nivel global, la Química Verde emerge como una disciplina fundamental para mitigar los impactos negativos de la industria química tradicional, promoviendo prácticas más seguras y sostenibles.

Así, este manuscrito se estructura en cinco secciones principales. La primera contextualiza el concepto de Química Verde, sus principios y su relevancia actual. La segunda analiza aplicaciones prácticas de la Química Verde en dos áreas clave: la economía circular y la regeneración a través de la biomímesis. La tercera discute los desafíos institucionales y las oportunidades para integrar la Química Verde en las políticas públicas, proporcionando ejemplos comparados de otros países. La cuarta se centra en el estado actual, los desafíos y las perspectivas futuras de la Química Verde en Chile. Finalmente, la quinta sección ofrece propuestas de políticas públicas específicas para fomentar la adopción de la Química Verde en el país, subrayando la necesidad de una coordinación institucional robusta.

Este documento tiene como objetivo ser un referente para académicos/as, responsables de políticas públicas y actores de la industria, público en general, entre otros importantes actores, ofreciendo un marco conceptual y propuestas concretas para avanzar hacia un futuro más sostenible en Chile.

1.1 La Química Verde en contexto

La industria química siempre ha sido un agente principal para el desarrollo industrial, el crecimiento económico y la innovación. Por ejemplo, el 14% del valor agregado de la industria manufacturera de Chile venía de industrias químicas en 2019 (Banco Mundial, 2023). Además, varias innovaciones de la humanidad se han realizado con base en los conceptos fundamentales de la química. Entre los ejemplos más llamativos se encuentran el desarrollo de antibióticos inspirado por la penicilina, la elaboración de rutas sintéticas para fármacos como Taxol –que se utiliza en el tratamiento de diversos tipos de cáncer–, procesos químicos disruptivos como Haber-Bosch para la generación de fertilizantes, o plásticos que representan los materiales antropogénicos más abundantes localizables en prácticamente todos los aspectos de la vida humana. Estas invenciones y sus desarrollos han asegurado la base del crecimiento de la so-

ciudad como es conocida hoy. Sin embargo, el origen de estas tecnologías corresponde a tiempos donde los conceptos de la sostenibilidad todavía no formaban parte del pensamiento científico. Las producciones de muchos productos químicos de uso común son una de las principales fuentes de contaminación, peligro y problemas que nos han llevado a una situación medioambiental desafiante. Así, la eutrofización de las tierras y aguas a base del uso excesivo de fertilizantes, la contaminación del planeta con residuos plásticos o la acumulación de fármacos, disruptores hormonales y otros compuestos problemáticos son el resultado de un manejo de compuestos químicos irresponsable, que no considera la integridad de la naturaleza o la salud humana en su fundamento.

A partir de las décadas 1950 y 1960 comenzó una tendencia que ha llevado a una comprensión y consideraciones adecuadas para mejorar este statu quo de despreocupación por consecuencias ambientales en la innovación. El cambio se ha manifestado en la generación de la disciplina de QV, que se define como “el diseño de productos y procesos químicos que reducen o eliminan el uso o la generación de sustancias peligrosas” (Anastas y Warner, 1998, p. 11). La historia de la Química Verde se remonta al año 1990, cuando la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) la convirtió en política oficial del país al firmar la Ley Federal de Prevención de la Contaminación. Esta política consideró términos como la reducción de la fuente de uso de sustancias peligrosas, la prevención de la contaminación y otros conceptos para la producción de productos químicos en su base¹.

Aunque los conceptos aislados de la Química Verde ya se conocían o utilizaban antes, esta encontró atención mundial a través de la formulación de los 12 Principios de la Química Verde, de Paul Anastas y John Warner (1998). Con su publicación seminal, estos pioneros iniciaron hace más de 25 años la investigación en un área de rápido crecimiento de la innovación química (Noce, 2017). La QV se ha convertido en un área de investigación importante, buscando ser un vehículo para un futuro sostenible. La comunidad ha crecido constantemente en diversas disciplinas y sobre todo pasando fronteras, generando una cantidad importante de investigaciones significativas. Actualmente, la Química Verde es un campo activo con impactos en diferentes gobiernos,

instituciones, universidades y empresas, que están adoptando sus prácticas en planes de estudio, programas de investigación o en su ADN corporativo.

Los 12 Principios de Química Verde, considerando su orden comúnmente utilizado y de forma general en sus definiciones, son (Anastas y Warner, 1998; Anastas y Eghbali, 2010):

1. Prevención de residuos: en vez de purificar, limpiar y tratar residuos generados, se recomienda priorizar y planificar para minimizarlos en cada paso y proceso.
2. Economía atómica: reducir desechos a nivel molecular, maximizando el número de átomos de los reactivos incorporados en el producto final.
3. Síntesis química menos riesgosas: diseñar reacciones químicas y procesos de la forma más segura posible. Considerar previamente los riesgos de cada componente manejado, incluso los residuos.
4. Diseño de químicos seguros: minimizar la toxicidad durante el diseño de las reacciones o procesos. Predecir y evaluar aspectos como propiedades físicas, toxicidad y destino final en el medioambiente.
5. Solventes y auxiliares seguros: seleccionar el solvente más seguro para ser utilizado. Minimizar el uso total de solventes y auxiliares, ya que estos representan una gran cantidad de residuos generados.
6. Diseño para eficiencia energética: elegir el proceso químico más eficiente en uso de energía. Evitar calentar o enfriar, presurizar o el uso de técnica de vacío. Idealmente utilizar temperatura ambiente y presión atmosférica para reacciones y procesos.
7. Uso de recursos renovables: usar sustancias provenientes de recursos renovables (por ejemplo, plantas) con preferencia sobre compuestos provenientes de fuentes petroquímicas.
8. Reducir derivados: minimizar el uso de derivados temporales, tales como intermediarios en los procesos.
9. Catálisis: aplicar catálisis en las reacciones o procesos. Elegir catalizadores para aumentar selectividad, minimizar desechos y reducir tiempos de reacción y uso de energía.

1 Ver más en <https://www.epa.gov/greenchemistry>

10. Diseño para degradación: diseñar compuestos químicos degradables y de fácil eliminación. Asegurar que los reactivos y productos de degradación sean no tóxicos, no acumulativos, ni persistentes en el medioambiente.
11. Prevención de polución en línea: controlar las reacciones químicas o procesos en tiempo real, para prevenir la formación y liberación de productos potencialmente dañinos, peligrosos y contaminantes.
12. Química segura para prevenir accidentes: elegir y desarrollar procesos químicos más seguros, minimizando el riesgo intrínseco de accidentes. Conocer los posibles riesgos y asesorarse de antemano.

Es importante destacar que los principios de la Química Verde son un marco conceptual y no una ley o reglas rígidas para el desarrollo de un producto o tecnología. Cada consideración de uno o varios de estos principios representa un cambio y una mejora significativa hacia la sostenibilidad. Al implementar incluso un solo principio, se puede observar una reducción en el uso de recursos tóxicos o no renovables, una mejora en la eficiencia energética o una disminución en la generación de residuos. Estos pequeños pasos, cuando se suman, pueden generar un impacto positivo considerable en la industria química y en el medioambiente en general. Un hecho clave para considerar es que muchos, si no todos, de los 12 Principios se complementan y algunos, incluso, forman parte de otros.

Además, es relevante señalar que la QV no solo tiene el potencial de reducir significativamente los impactos negativos en el medioambiente y la salud humana, sino que también puede catalizar nuevas oportunidades económicas y sociales, impulsando la creación de empleo y el crecimiento económico sostenible mediante la innovación.

1.2 Desafíos generales de sustentabilidad: ODS y límites planetarios

La importancia de la Química Verde para abordar los desafíos ambientales se hace cada vez más evidente. El informe de los Límites Planetarios del Instituto de Re-

siliencia de Estocolmo del año 2023 (Richardson et al., 2023) indica que seis de los nueve Límites Planetarios han sido excedidos, incluyendo la pérdida de biodiversidad, el cambio climático, la acidificación de los océanos, el uso del agua dulce, el cambio en el uso de la tierra y la carga del fósforo y nitrógeno. Por ejemplo, la tasa actual de extinción de especies es alarmante, alcanzando niveles hasta mil veces superiores a la tasa natural. Además, el aumento de la temperatura global ha superado ampliamente el límite de 1,5 grados Celsius establecido en el Acuerdo de París, exacerbando fenómenos climáticos extremos y amenazando ecosistemas vitales (ONU, 2015).

Un tema central en los avances de sustentabilidad y la protección de los Límites Planetarios tiene que ver con entender la interacción entre las dimensiones ambientales, económicas y sociales. En cierto sentido, las definiciones modernas de sustentabilidad y desarrollo sostenible toman una mirada sistémica en que se busca compatibilizar estas dimensiones y se reconocen sus interacciones (ONU, 2019).

Los llamados Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) representan varios sistemas intercalados y ofrecen una herramienta de cómo tratar problemas en una forma sistémica. Sin embargo, se observa un atraso sustantivo a nivel mundial en sus logros, lo que agrega un desafío adicional. Informes recientes muestran que solo cerca del 12% de las 140 metas establecidas están bien encaminadas, alrededor de la mitad están moderada o gravemente desviadas de la trayectoria deseada (aunque muestran avances) y el 30% no ha experimentado ningún avance o, incluso, han retrocedido respecto a la situación registrada en 2015 (ONU, 2023).

En Chile hay una situación de avance respecto de los ODS relativa al nivel mundial: se encuentra en la posición 32 de 167 países, con 48,6% de metas logradas o en camino a lograrlas, 15,7% con progreso limitado y el restante 35,7%, empeorando (ONU, 2024). La Figura 1 presenta de modo visual la situación de Chile en términos de los objetivos de desarrollo sostenible. Como es evidente, varias de los diferentes ámbitos interactúan con aspectos relacionados con la QV.

Figura 1. Situación actual de Chile en términos de los ODS



Fuente: Sachs, Lafortune y Fuller, 2024.

SDG: Sustainable Development Goals

Este panorama refleja una situación mixta, donde ciertos objetivos han avanzado significativamente, mientras que otros enfrentan desafíos importantes. Tomemos como ejemplo el ODS 2 (Fin del Hambre) que aparece como

una dimensión con grandes desafíos y en una situación de estancamiento, y el ODS 13 (Acción por el Clima), y descompongamos sus indicadores en la Tabla 1.

Tabla 1. **Situación actual de Chile relacionada con el ODS 2 (Fin del Hambre) y ODS 13 (Acción por el Clima)**

ODS	Indicador	Situación en Chile
ODS 2: Hambre Cero	Prevalencia de desnutrición	○ Mejora
	Prevalencia de retraso en el crecimiento en niños menores de 5 años	○ Mejora
	Prevalencia de emaciación en niños menores de 5 años	⊗ Sin datos
	Prevalencia de obesidad (IMC ≥ 30)	● Empeora
	Nivel trófico humano	● Empeora
	Rendimiento de cereales	● Estancado o aumentando lentamente
	Índice de manejo sostenible de nitrógeno	● Estancado o aumentando lentamente
	Cierre de la brecha de rendimiento	⊗ Sin datos
	Exportaciones de pesticidas peligrosos	⊗ Sin datos
ODS 13: Acción por el Clima	Emisiones de CO ₂ de la combustión de fósiles y producción de cemento	● Estancado o aumentando lentamente
	Emisiones de CO ₂ incorporadas en las importaciones	● Empeora
	Emisiones de CO ₂ incorporadas en las exportaciones de combustibles fósiles	○ Mejora
	Puntuación de precios del carbono a EUR60/tCO ₂	● Estancado o aumentando lentamente

Fuente: elaboración propia con base en Sachs, Lafortune y Fuller, 2024.

El ODS 2 (Fin del Hambre) presenta grandes desafíos, particularmente en aspectos como la obesidad, que está relacionada con sistemas alimentarios y el manejo sustentable del nitrógeno. La situación de estancamiento en este objetivo subraya la necesidad de intervenciones más efectivas y sostenibles. De manera similar, el ODS 13 (Acción por el Clima) muestra que Chile enfrenta retos significativos relacionados con la emisión de CO₂ y otros aspectos ambientales críticos donde la QV puede ofrecer soluciones importantes y realizar aportes.

Los fenómenos climáticos extremos, como sequías e inundaciones, continúan afectando al país, acentuando

la necesidad urgente de adoptar medidas más ambiciosas y efectivas.

Este análisis resalta la necesidad urgente de intensificar los esfuerzos y adoptar medidas más ambiciosas para alcanzar un futuro sostenible. En este contexto, la química verde emerge como una herramienta fundamental para promover la sostenibilidad y la resiliencia frente a los desafíos ambientales, económicos y sociales a nivel global y local. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE, 2011) destaca la importancia de la Química Verde en el contexto del desarrollo sostenible y cómo puede contribuir significativamente a

la consecución de los ODS y abordar desafíos ambientales como la reducción de emisiones, la gestión de residuos y la conservación de recursos naturales. Al reducir el uso de sustancias peligrosas, mejorar la eficiencia de los procesos químicos y fomentar la innovación en productos más seguros y sostenibles, la Química Verde se convierte en un habilitador crucial para múltiples metas de desarrollo sostenible.

2. Química Verde en la práctica: análisis de ejemplos y aplicaciones con el lente de los 12 Principios

La inclusión de la Química Verde en las estrategias de desarrollo científico-tecnológico, socioeconómico, industrial y político tiene un impacto significativo y multifacético. Desde una perspectiva científica y tecnológica, la QV impulsa la innovación y el desarrollo de procesos y productos más seguros y eficientes, reduciendo el uso de sustancias peligrosas y promoviendo la sostenibilidad. Socioeconómicamente, la adopción de los principios de QV puede mejorar la calidad de vida al disminuir la exposición a químicos nocivos, creando empleos en nuevos sectores verdes y fomentando un crecimiento económico más equitativo y sustentable (Mulvihill et al., 2011).

En el ámbito industrial, la QV permite a las empresas mejorar su competitividad y reputación al adoptar prácticas más responsables y eficientes, lo que puede traducirse en ahorros de costos y en una mayor aceptación por parte de consumidores conscientes del medioambiente. Políticamente, la integración de la QV en las políticas públicas es esencial para establecer normativas que promuevan la innovación sostenible, incentiven la investigación y desarrollo en tecnologías verdes, y aseguren la protección del medioambiente y la salud pública. Por ello, la relevancia de la política pública en este contexto es crucial para crear un marco regulatorio que facilite la transición hacia una economía más sostenible.

En esta sección presentamos ejemplos en tres líneas concretas (economía circular, regeneración a través de la biomímesis y gestión circular de macronutrientes) sobre cómo la Química Verde presenta herramientas poderosas para enfrentar desafíos de sustentabilidad (Silvestri et al., 2021; Ncube et al., 2023; Ilieva et al., 2022; Lebdioui, 2022). Estas tres líneas han sido elegidas debido a su relevancia y potencial para transformar la industria química y otros sectores productivos. La economía circular se enfoca en la reutilización, reciclaje y reducción de desechos, promoviendo un uso más eficiente de los

recursos. La regeneración, por otro lado, busca restaurar y mejorar los sistemas naturales, incentivando procesos que no solo minimicen el daño ambiental, sino que también contribuyan a la recuperación del ecosistema. La gestión circular de macronutrientes, en tanto, reduce la dependencia de fertilizantes sintéticos y transforma residuos en nuevos recursos. Estas líneas se ajustan perfectamente con los principios de la Química Verde, demostrando su capacidad para impulsar innovaciones sostenibles y prácticas responsables.

2.1 La QV en el contexto de la construcción de una nueva economía circular

La economía circular (EC) ha surgido como una herramienta importante para enfrentar de modo relacionado los desafíos de sustentabilidad con aspectos ambientales-sociales-económicos y sus interacciones. La EC promueve el intercambio de bienes y servicios de modo regenerativo y restaurador por diseño e intención. La QV desempeña un papel fundamental en la consecución de los objetivos de la EC al promover la sostenibilidad y la eficiencia en los procesos químicos y la producción industrial.

La ambición de la EC se traduce a su vez en tres principios y diversas estrategias prácticas y jerárquicas (Ellen MacArthur Foundation, 2024). Los principios plantean como primera medida reducir el consumo de las materias primas vírgenes, garantizando que los materiales renovables se usen y restituyan considerando los ciclos naturales, mientras que los materiales no renovables deben ser incorporados en productos de manera que puedan ser recuperados vía reúso o reciclaje. El segundo principio establece que el uso de los productos debe maximizarse a partir del diseño y modelos de negocios que garanticen la extensión de su vida útil, con estrategias como el uso compartido de los productos, su restauración, remanufactura y reciclaje. Por último, el tercer principio llama a hacerse cargo de las externalidades o de todos los impactos que se generan en términos de emisiones y consumo (Ncube et al., 2023).

Lograr una EC va más allá de gestionar los residuos: implica desarrollar métodos y tecnologías que privilegien materias primas renovables, minimicen sustancias tóxicas y optimicen la eficiencia energética, aspectos fundamentales de la Química Verde, reflejados en su primer, tercer, cuarto, séptimo, octavo, noveno, décimo y décimo primer principio. La QV, al cerrar ciclos de materiales y revisar la materialidad de los productos y la complejidad de los procesos, promueve la regeneración, contribuyen-

do así a la consecución de la EC (Silvestri et al., 2021). Así, ambas disciplinas se complementan como medios para un fin más amplio: regenerar la naturaleza y propiciar condiciones que favorezcan la vida mediante una interacción sostenible con el medioambiente para satisfacer nuestras necesidades.

2.2 Claves desde la naturaleza para la QV como camino a la regeneración

Lograr el objetivo de la regeneración utilizando la EC como estrategia y la QV como herramienta, y considerando el contexto de los desafíos planteados por la superación de los Límites Planetarios nos lleva a otra disciplina de interés, la biomímesis. Esta nos plantea la posibilidad de imitar a la naturaleza y sus principios para lograr soluciones perfectamente adaptadas al medioambiente, lo cual, sin duda, ahorrará tiempo y recursos en la búsqueda de tecnologías que reparen los daños que algunas innovaciones inevitablemente tienden a generar (Ilieva et al., 2022).

La biomímesis plantea entre otros principios el uso de las soluciones locales y de las condiciones ambientales para los procesos, es decir, presión atmosférica, temperatura ambiente y el agua como solvente universal (Bhushan, 2018). Además, considera a la física como aliada fundamental de la química y primera en prioridad considerando que muchas de las soluciones a problemas que hoy se abordan con química pueden lograrse cambiando propiedades físicas de los materiales. Por ejemplo, el cambio en propiedades ópticas de materiales a nivel nanomolecular puede significar el cambio en el reflejo del espectro de luz, generando una modificación de color en materiales que generalmente desde la química se logran con pigmentación. Al reemplazar los pigmentos químicos por soluciones ópticas se podrían eliminar los impactos ambientales y humanos, tales como la contaminación del agua, derivados de la fabricación de colorantes sintéticos y su uso en las industrias textil, de tintes y estampación, de curtidos y pinturas, del papel y cosmética. A modo de ejemplo, la industria textil pierde cada año hasta 200.000 toneladas de tintes en aguas residuales, siendo catalogada como el segundo sector industrial más contaminante de la civilización moderna (Islam et al., 2023).

En el ámbito empresarial, las soluciones de QV e inspiradas en la naturaleza han demostrado su valiosa contribución a la economía circular a través de numerosos ejemplos concretos. Así, en la industria de la alimentación, la Química Verde se utiliza para desarrollar enva-

ses biodegradables y compostables, que ayudan a reducir la cantidad de plástico de un solo uso y a fomentar la recogida selectiva de residuos orgánicos. Asimismo, en el sector de la electrónica, se están investigando y desarrollando materiales y métodos de fabricación que minimizan el uso de metales raros y tóxicos, contribuyendo a la extensión de la vida útil de dispositivos y a la recuperación de componentes valiosos al final de su vida útil.

Además, un ejemplo emblemático de biomímesis aplicada es el desarrollo de pinturas que se limpian solas, emulando el principio hidrofóbico de las hojas de loto, donde las gotas de agua se deslizan sobre la superficie, arrastrando consigo la suciedad. Esto demuestra cómo la Química Verde se ha convertido en una herramienta esencial para que las empresas avancen hacia una economía circular de la mano de los principios de la naturaleza, generando beneficios tanto ambientales como económicos.

Es crucial resaltar que la biomímesis no solo se centra en las técnicas, sino en adoptar una perspectiva que se alinee con los principios naturales. Este enfoque sistémico considera las interacciones y simbiosis entre organismos, así como la capacidad de generar soluciones a través de una colaboración no jerárquica, sino cooperativa. Esto nos insta a reconsiderar el entorno en el que surgen las soluciones químicas en la actualidad, destacando la necesidad de un cambio de paradigma que favorezca soluciones genuinamente eficientes y armoniosas en los ámbitos social, ambiental y económico.

2.3 Caso de aplicación del primer y séptimo principio de la QV. La gestión circular de macronutrientes en ciudades

La producción de nutrientes para la agricultura conlleva una serie de impactos negativos significativos en términos de consumo energético y emisiones de gases de efecto invernadero. Los procesos químicos utilizados en la fabricación de fertilizantes sintéticos, como el amoníaco y el fosfato, son intensivos en energía y altamente dependientes de combustibles fósiles. Se estima que la producción de amoníaco consume alrededor del 1-2% de la energía global y es responsable de aproximadamente el 3% de las emisiones mundiales de dióxido de carbono (CO₂). Además, la síntesis de fertilizantes de fosfato implica la extracción y procesamiento de fosfato de roca, un proceso que emite grandes cantidades de gases de efecto invernadero y puede tener impactos devastadores en el medioambiente local, como la acidificación del sue-

lo y la contaminación del agua. En conjunto, estos procesos químicos asociados con la producción de nutrientes para la agricultura contribuyen significativamente al cambio climático y a la degradación ambiental, subrayando la necesidad urgente de buscar alternativas más sostenibles y respetuosas con el medioambiente para la provisión de los nutrientes agrícolas.

Una posible solución a este problema podría encontrarse en nuestros hogares. La mayor parte de los nutrientes que consumimos a través de los alimentos son excretados en nuestra orina, dado que nuestros organismos ya cuentan con reservas suficientes. Sin embargo, en lugar de ser reutilizados, estos nutrientes son desechados, diluidos y dirigidos hacia las plantas de tratamiento de aguas residuales. Entre los componentes más ricos en nutrientes presentes en las aguas residuales, destaca la orina humana, la cual representa menos del 1% del volumen total, pero concentra el 80% del nitrógeno y el 50% del fósforo contenidos en estas aguas. Se ha descubierto la manera de reciclar esta orina para convertirla en un valioso fertilizante para su utilización en tierras de cultivo, ofreciendo así una alternativa sostenible y eficiente para la gestión de nutrientes en la agricultura.

La gestión circular de macronutrientes emerge como un caso destacado de aplicación de principios de Química Verde. En ciudades como Ámsterdam y Estocolmo, se están implementando sistemas de recolección de orina a nivel doméstico y público, seguidos de procesos de tratamiento y desinfección para su aplicación segura en la agricultura. Este enfoque no solo reduce la dependencia de fertilizantes sintéticos, sino que también cierra el ciclo de los nutrientes, transformando un residuo en un recurso valioso para la producción de alimentos.

Otro ejemplo clave en la gestión circular de macronutrientes, usando principios de la Química Verde, es el compostaje de residuos orgánicos. Mediante el compostaje aeróbico de materiales vegetales y de cocina, como restos de frutas, verduras y cáscaras de huevo, se puede obtener un fertilizante rico en nutrientes que puede ser utilizado de manera segura en la agricultura. En ciudades como San Francisco y Oslo, se están implementando sistemas de recolección de estos residuos orgánicos, que luego se procesan en plantas de compostaje. Este com-

postaje no solo reduce la cantidad de residuos enviados a los vertederos, sino que también cierra el ciclo de los nutrientes, devolviendo los nutrientes a la tierra de manera sostenible.

3. La QV en las políticas públicas

3.1 Desafíos institucionales y de políticas públicas: una discusión conceptual

La discusión planteada hasta ahora destaca el valor potencial de la QV en diferentes áreas relacionadas con desafíos económicos-ambientales-sociales de sustentabilidad. La QV y sus aplicaciones presenta un nivel de desarrollo relativamente reciente y, por ende, es de conocimiento incipiente en la sociedad. En cierto sentido, la Química Verde representa lo que podemos denominar conceptualmente un conjunto de “nuevas tecnologías” que están en un grado relativamente reciente de desarrollo. Esto implica que los beneficios de adoptar estas tecnologías no solo se limitan al ámbito privado de quienes las implementan, sino que también generan beneficios más amplios, que pueden incluir la reducción de impactos ambientales, mejoras en la salud pública y la promoción de prácticas sostenibles a nivel global, creando un valor compartido que trasciende los intereses individuales.

La QV opera en el espacio de políticas públicas relacionadas con actividades que producen externalidades tanto a nivel local como global y en contextos en que existen importantes problemas de información asimétrica y ausente. Todas estas dimensiones sugieren que existen oportunidades desde la política pública para aportar al desarrollo de la QV, como conjunto de herramientas para enfrentar desafíos relevantes de sustentabilidad en sus dimensiones ambientales, sociales y económicas².

En concreto, en este contexto existen las siguientes líneas de potenciales intervenciones de políticas públicas que favorecerían el desarrollo de la QV:

- **Intervenciones, políticas y programas para corregir externalidades negativas de química tradicional (QT):** en este contexto se inscriben políticas tributarias de impuestos y subsidios que, por una parte, gravan con impuestos a productos o servi-

² La discusión en este párrafo corresponde a lo que técnicamente se llama “fallas de mercado” y que ameritan intervención pública (Gruber, 2015). Es interesante notar que no existiría espacio para políticas públicas que promuevan la QV en una situación en que no existiera ninguna de las distorsiones presentadas.

cios que producen externalidades o que promueven aquellos que las evitan y/o generan externalidades positivas³. Este tipo de políticas tributarias también son importantes para la promoción de adopción de tecnologías nuevas y limpias. Sin embargo, investigación más reciente también propone la prohibición de uso de ciertas tecnologías sucias, así como promoción de tecnologías limpias en contextos en los cuales es muy difícil técnica y políticamente utilizar intervenciones tributarias (de impuestos y subsidios)⁴.

- **Intervenciones, políticas y programas para promover la producción de información relacionada con QV:** dada la ausencia de información adecuada y el acceso asimétrico a esta, existe espacio para políticas que buscan mejorar la entrega de información. Estas políticas van desde mandatos del tipo sellos (como los que se usan en alimentos y electrodomésticos en Chile) hasta regulaciones internacionales o nacionales que las empresas deben cumplir. Un ejemplo de estas regulaciones son las normas ISO (Organización Internacional de Normalización), que establecen estándares que las empresas pueden seguir para asegurar que sus productos y procesos cumplan con ciertos criterios de calidad y sostenibilidad. Estas regulaciones ayudan a asegurar que la información proporcionada sea fidedigna, permitiendo que tanto los productores como los consumidores puedan identificar opciones más sostenibles. Además, pueden existir políticas públicas que promuevan la difusión de prácticas exitosas relacionadas con tecnologías limpias en QV, como la promoción de sus 12 Principios o casos de éxito. Esto es particularmente importante para organizaciones públicas y privadas más pequeñas, que a menudo no cuentan con recursos para investigación y desarrollo. También entra en esta categoría la información sobre los requisitos establecidos en otros países para la venta de productos relacionados con aspectos químicos.
- **Intervenciones que intenten acelerar la innovación de tecnologías limpias asociadas a QV:** en esta línea se encuentran acciones que busquen incentivar directamente la adopción de tecnologías que usan QV vía préstamos preferentes, incentivos tributarios, compras públicas, incentivos de la colaboración y transferencia privada-científica o combinaciones de las anteriores. La motivación conceptual de esta línea de opciones se relaciona con la promoción de tecnologías nuevas, que típicamente requieren generar masas críticas iniciales para poder generar condiciones necesarias para su expansión⁵.
- **Intervenciones que buscan promover la capacitación en QV:** se consideran intervenciones en diferentes márgenes asociados a la promoción de educación y capital humano, desde el sistema escolar hasta el sistema universitario de pre y postgrado y el sistema de capacitación y formación continua, incluyendo los sistemas técnicos de nivel medio y superior.
- **Institucionalidad de coordinación de promoción de QV:** la promoción de la Química Verde implica acciones en diferentes sectores, lo que puede requerir algún tipo de institucionalidad de coordinación para potenciar sus impactos. Aquí se pueden tomar diferentes enfoques (que se discuten en la siguiente sección), pero un ejemplo de roles de coordinación a nivel federal en Estados Unidos es la Office of the President of the United States. Este organismo es un buen ejemplo porque, a través de sus diversas agencias y departamentos, facilita la implementación y promoción de políticas de sostenibilidad y QV de manera integrada y coherente. Por ejemplo, la Office of Science and Technology Policy (OSTP) juega un papel crucial en la coordinación de investigaciones y desarrollos tecnológicos relacionados con la Química Verde. Además, otras agencias federales como la Environmental Protection Agency

3 Un ejemplo estudiado en la literatura es el caso de los *bonuses-maluses* en el contexto del mercado automotriz en Francia (D'Haultfoeuille, Givord y Boutin, 2014).

4 Nuevamente el caso del mercado de automóviles presenta un ejemplo interesante aquí: las políticas de restricciones vehiculares “inteligentes” —como las *low-emission zones* en Europa— y restricciones a vehículos antiguos o con tecnologías sucias, como en diferentes países, surgen como opciones eficientes para promover el uso de tecnologías limpias (como convertidor catalítico o automóviles con bajas emisiones) y desincentivar el uso de tecnologías sucias en muchos contextos (Barahona, Gallego y Montero, 2020).

5 Se puede hacer notar respecto de este tipo de intervenciones y las previas que parte de la literatura argumenta, que la QV presenta altas tasas de rentabilidad privada, pese a lo que no se ha adoptado por las empresas (Meyer y Gonzalez, 2014). Si este es el caso, entonces la falta de información y de generación de mercados suficientemente grandes serían fuentes de fallas de mercado, que políticas públicas como las mencionadas podrían corregir.

(EPA) y el Department of Energy (DOE) colaboran estrechamente para fomentar prácticas sostenibles y tecnologías limpias, asegurando así un enfoque unificado y efectivo en la promoción de la QV en múltiples sectores.

Esta discusión conceptual plantea diferentes márgenes de acción en los que se pueden adoptar los principios de la Química Verde. Ciertamente, diferentes instrumentos pueden tener impactos variados según el contexto en el que se apliquen. La investigación y la evidencia comparada informan sobre cuáles de estos elementos son más efectivos. Sin embargo, una visión general puede agregar diferentes espacios de posibilidades, permitien-

do identificar áreas donde la implementación de la QV puede ser más beneficiosa.

3.2 Contexto comparado de Química Verde en el desarrollo sustentable

En esta sección presentamos una serie de ejemplos sobre cómo la promoción de la QV se implementa en términos de políticas públicas en diferentes países. La Tabla 2 presenta la información relacionando las acciones con las líneas mencionadas en la sección previa para tres países seleccionados (por conveniencia y por información disponible) y muestra las conclusiones más importantes y algunos ejemplos.

Tabla 2. Políticas públicas en tres países de la OCDE

País	Intervenciones tributarias	Entrega de información	Incentivos directos a la QV	Promoción de QV en capacitación	Coordinación
Alemania⁶	Reducción de impuestos para empresas que adopten tecnologías limpias	Campañas de información, programas de concientización pública y educación ambiental	Subvenciones para proyectos de innovación en QV	Programas de educación y formación en Química Sustentable	Coordinación entre ministerios e industria
Canadá⁷	Créditos fiscales para empresas que invierten en tecnologías limpias y sustitución de productos tóxicos	Campañas de información sobre la gestión sostenible de productos químicos	Financiamiento de proyectos de investigación y desarrollo en QV	Becas y subsidios para estudios en QV	Colaboración entre agencias gubernamentales y universidades
Países Bajos⁸	Incentivos fiscales para el desarrollo de tecnologías verdes, subsidios para empresas que disminuyan el uso de combustibles fósiles y reutilicen los desechos potenciando la economía circular	Difusión de información sobre biotecnología y uso de materias primas renovables	Financiamiento de proyectos de investigación y desarrollo en QV	Adopción del compromiso del Green Chemistry Commitment (GCC) por universidades y programas de estudios	Colaboración entre gobiernos de diversos países, universidades y agencias gubernamentales

Fuente: elaboración propia.

6 Tatsachen über Deutschland (2024a), BioEconomía (2023), Tatsachen über Deutschland (2024b), Leuphana University (2024), ESG Hoy (2024).

7 Madera Sostenible (2024), University of Toronto (2024a, 2024b), GreenCentre Canada (2024), PV Magazine México (2023), Health Canada (2024).

8 Agro Chemistry (2024), Brightsite Center (2024a, 2024b), TNO (2024), NWO (2024), Government of the Netherlands (2024), Utrecht University (2024), University of Groningen (2024), Groene Chemie (2024), ChemistryNL (2024).

Una primera conclusión de la revisión de políticas comparadas es que, en algunos países de la OCDE, el reconocimiento de la importancia de la QV se refleja en la creciente adopción de medidas concretas destinadas a promover su integración en diversos sectores industriales y gubernamentales. Esta tendencia evidencia un cambio de paradigma hacia una mentalidad más orientada a la sostenibilidad, donde los países miembros reconocen la necesidad de adoptar un enfoque más responsable y ético hacia la producción y el consumo de productos químicos. A través de la inversión en investigación y desarrollo de tecnologías limpias y procesos innovadores, los países de la OCDE están sentando las bases para una transformación significativa en la forma en que se concibe y se lleva a cabo la producción química a nivel mundial.

A nivel nacional, varios países miembros de la OCDE han implementado iniciativas específicas para promover la Química Verde. Por ejemplo, Alemania ha establecido el concepto de “Química Blanca” para fomentar la innovación en productos químicos menos peligrosos y más sostenibles. En los Países Bajos, se han desarrollado políticas para promover la biotecnología industrial y la producción de materias primas renovables. Alemania ha implementado políticas que fomentan la innovación en tecnologías limpias y la reducción de emisiones y, asimismo, Canadá ha desarrollado estrategias para la gestión sostenible de productos químicos y desechos. En los países miembros de la OCDE, entre los que se incluye Chile, el compromiso con el desarrollo de la Química Verde ha experimentado un notable incremento. Este no se limita únicamente a la mitigación del impacto ambiental a través de la implementación de un diseño y análisis previo que anticipe las posibles consecuencias asociadas a la creación de nuevos productos, servicios o tecnologías, sino que se ha intensificado la concienciación sobre la importancia fundamental de la Química Verde como un pilar estratégico para la innovación, promoviendo un desarrollo que no solo es sostenible, sino también orientado hacia la construcción de un futuro más equitativo y respetuoso con el medioambiente. Dicho enfoque no solo responde a las exigencias contemporáneas en materia de sostenibilidad, sino que también posiciona a la Química Verde como un motor esencial para el progreso social y económico a nivel global.

4. Química Verde en Chile: estado actual, desafíos y futuro

Los Acuerdos de Producción Limpia (APL) representan una oportunidad clave para impulsar la transición hacia la Química Verde en Chile. Estos acuerdos, que se establecen de manera voluntaria entre el sector empresarial y las autoridades gubernamentales, no solo buscan mejorar la eficiencia y la competitividad de las empresas, sino que también pueden servir como una puerta de entrada hacia prácticas más sostenibles y respetuosas con el medioambiente.

Estos acuerdos se enfocan en mejorar la sustentabilidad de los procesos empresariales, priorizando medidas como la eficiencia energética, la gestión hídrica responsable y la valorización de residuos, entre otras iniciativas. Desde la promulgación de la Ley N° 20.416, que fija las normas especiales para las empresas de menor tamaño en 2010, el Ministerio de Economía y el Ministerio de Medio Ambiente han asumido la responsabilidad de coordinar las actividades entre los entes gubernamentales y las empresas privadas durante todas las etapas de desarrollo de los Acuerdos de Producción Limpia (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2024; ASCC, 2024).

A partir del año 2012, los Acuerdos de Producción Limpia han adquirido reconocimiento a nivel internacional, siendo considerados por las Naciones Unidas como la primera Acción de Mitigación Nacionalmente Apropiada en el mundo (Estay, 2021). Este reconocimiento destaca la contribución significativa de estos acuerdos a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y su papel crucial en la promoción de prácticas empresariales más sostenibles a nivel global.

En el año 2023, se registraron un total de 60 Acuerdos de Producción Limpia en Chile⁹, abarcando una amplia gama de sectores, desde la industria manufacturera hasta el turismo y la agricultura. Estos acuerdos están diseñados para promover medidas concretas como la eficiencia energética, la gestión hídrica responsable y la valorización de residuos, todas las cuales son áreas en las que la Química Verde puede desempeñar un papel fundamental. Al priorizar la reducción de emisiones, el uso eficiente de recursos y la minimización de residuos tóxicos, los Acuerdos de Producción Limpia pueden incentivar a las empresas a adoptar prácticas y tecnologías

9 Ver más en: <https://www.sag.gob.cl/ambitos-de-accion/acuerdos-de-produccion-limpia-apl>

más limpias y sostenibles, lo que a su vez contribuirá a impulsar la implementación de principios de Química Verde en el ámbito empresarial chileno.

Actualmente, en Chile, las facultades de Química de la Universidad de Santiago de Chile y la Facultad de Química y de Farmacia de la Pontificia Universidad Católica de Chile han firmado recientemente (2024) el compromiso con la organización estadounidense liderada por John Warner, Beyond Bening, a través de la firma del Green Chemistry Commitment, poniendo de manifiesto el genuino interés de incluir este relevante aspecto de la Química en los currículos de las carreras y especializaciones (SAG, 2024).

La Química Verde en Chile está estrechamente relacionada con los esfuerzos del país para adoptar prácticas más sostenibles y respetuosas con el medioambiente. Dentro de este marco, es crucial abordar las prácticas actuales en la agricultura, un sector que representa un desafío significativo debido a su alta dependencia de fertilizantes sintéticos y los impactos ambientales asociados. La implementación de soluciones basadas en la QV en la gestión de nutrientes agrícolas no solo se alinea con los objetivos de los APL, sino que también representa un paso importante hacia la sostenibilidad y la circularidad en la agricultura chilena.

5. Propuestas de políticas públicas

En esta sección presentamos un conjunto de propuestas que se derivan del marco conceptual presentado en la sección 3.1 de este trabajo y de la experiencia internacional revisada en la sección 3.2.

5.1 Propuesta Institucional: Política Nacional de Química Verde

La implementación de políticas públicas que fomenten la QV requiere de una institucionalidad robusta y coordinada. Nuestra principal propuesta institucional se relaciona con la creación de una Política Nacional de Química Verde (PNQV), siguiendo los esfuerzos de otros países, como Estados Unidos. La PNQV ayudaría a coordinar y promover iniciativas de QV en Chile. Haciendo la analogía de EE.UU., se podría pensar que su coordinación ejecutiva esté en el Ministerio del Medio Ambiente (MMA), en el Ministerio de Ciencia y Tecnología o en el Ministerio de Economía. Esta política podría partir por la sugerencia de definir objetivos relacionados con los 12 Principios de QV y desarrollar al menos las siguientes funciones:

- **Coordinación interministerial:** la creación de una Política Nacional de Química Verde (PNQV) requiere una sólida coordinación interministerial, que facilite la alineación de las políticas públicas relacionadas con la sostenibilidad y la innovación en Química Verde. En Chile, esto implica la formación de un comité interministerial con participación activa de los ministerios clave, como el Ministerio del Medio Ambiente (MMA), Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, Ministerio de Economía, Ministerio de Educación, Ministerio de Minería, Ministerio de Salud, Ministerio de Agricultura, Ministerio de Relaciones Exteriores, entre otros. Chile ya tiene experiencia en la creación de comités interministeriales, como el Consejo de Ministros para la Sustentabilidad, que ha sido fundamental para la adopción de políticas ambientales. Este modelo puede ser replicado para la Química Verde, con el objetivo de asegurar una gobernanza integral y coordinada, evitando duplicidades y maximizando los recursos. El rol de cada ministerio debe estar claramente definido: por ejemplo, el MMA podría liderar la agenda medioambiental, mientras que el Ministerio de Ciencia y Tecnología podría enfocarse en la promoción de la innovación y el desarrollo de nuevas tecnologías verdes y los Ministerios de Agricultura y Salud crear normativas y control respecto de los productos que cumplan con el "Sello Verde" para su posterior uso. Chile es signatario de acuerdos internacionales como el Acuerdo de París, que obliga al país a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero. La coordinación interministerial puede asegurar que las políticas de Química Verde contribuyan directamente a cumplir con estos compromisos internacionales, integrando la sostenibilidad en las políticas económicas y educativas del país.
- **Desarrollo normativo:** es esencial para garantizar que los principios de la Química Verde se integren adecuadamente en las regulaciones existentes. Esto incluye la revisión y actualización de normas que regulan la producción y uso de sustancias químicas, así como la implementación de nuevos estándares que promuevan prácticas sostenibles en la industria química. Chile ya cuenta con una serie de regulaciones ambientales y sanitarias, como la Ley REP (Responsabilidad Extendida del Productor, Ley N° 20.920) y la Ley sobre Bases del Medio Ambiente

(Ley N° 19.300), que podrían ampliarse para incluir principios de Química Verde. La implementación de nuevas normativas debería incluir la definición clara de criterios para la clasificación de productos y procesos como “verdes”, tomando como referencia estándares internacionales como los de la ISO y la OCDE. La normativa chilena ha avanzado en temas de sostenibilidad, pero todavía carece de directrices específicas sobre Química Verde. El desarrollo normativo en este ámbito podría comenzar con la incorporación de requisitos de química sostenible en las licitaciones públicas y proyectos financiados por el Estado, impulsando así el mercado de productos y tecnologías verdes.

- **Financiamiento y asistencia técnica:** para fomentar la investigación y el desarrollo (I+D) en Química Verde, es crucial establecer mecanismos de financiamiento que apoyen tanto a instituciones académicas como a empresas. Esto incluye subvenciones, créditos preferenciales y fondos concursables específicos para proyectos de Química Verde, así como asistencia técnica para la adopción de estas tecnologías en la industria. El Fondo de Innovación para la Competitividad (FIC) y Corfo (Corporación de Fomento de la Producción) ya juegan un papel importante en el financiamiento de proyectos de innovación en Chile. Sin embargo, se requiere la creación de líneas específicas de financiamiento orientadas a la Química Verde. Además, es importante proporcionar asistencia técnica para facilitar la transferencia de tecnología desde la academia hacia la industria, especialmente para las pequeñas y medianas empresas (pymes), que pueden carecer de los recursos para adoptar nuevas tecnologías sin apoyo. Chile tiene un sector de innovación en crecimiento, pero el financiamiento para proyectos de sostenibilidad todavía es limitado. La creación de incentivos fiscales para empresas que adopten principios de Química Verde, así como la integración de estos principios en las estrategias de desarrollo económico del país, puede acelerar la transición hacia una economía más sostenible.
- **Red Nacional de Innovación en Química Verde:** Chile cuenta con diversas instituciones académicas y centros de investigación que ya están trabajando en áreas relacionadas con la Química Verde. La creación de una red que conecte estos esfuerzos –vinculando a universidades, centros de investigación y la industria para fomentar la colaboración

en el desarrollo y aplicación de tecnologías verdes –evitaría la duplicación de esfuerzos, facilitando la transferencia de tecnología a la industria y maximizando el impacto de las investigaciones. Su funcionamiento debería permitir el intercambio de conocimientos, la formación de alianzas estratégicas y la difusión de mejores prácticas. También, si se incorporan casas de estudios y centros de innovación regionales, aseguraría una distribución más equitativa de los recursos y oportunidades de colaboración, lo que es clave para la descentralización de la ciencia y la tecnología en el país. Este enfoque colaborativo puede inspirarse en iniciativas como la Red Nacional de Ciencia y Tecnología, pero abordando específicamente la Química Verde.

- **Monitoreo y evaluación de avances en QV:** la implementación de políticas de Química Verde debe estar acompañada de un sistema robusto de monitoreo y evaluación para asegurar su efectividad, fundamentales para ajustar las políticas en función de los resultados obtenidos. Esto incluye el desarrollo de indicadores específicos que midan el impacto de estas políticas en términos de reducción de emisiones, eficiencia energética, reducción de residuos tóxicos y otros factores relevantes. La creación de un conjunto de indicadores alineados con los ODS de la ONU permitiría medir el progreso de manera más transparente y comparativa a nivel internacional. El país ya realiza monitoreos en diversas áreas a través de instituciones como el Ministerio del Medio Ambiente y el Instituto Nacional de Estadísticas (INE), esfuerzos que pueden ampliarse para incluir indicadores específicos de Química Verde, con la publicación periódica de informes que reflejen los avances y desafíos en la implementación de la PNQV. Para lograr este objetivo, Chile puede beneficiarse de la experiencia de otros países que ya han implementado sistemas de monitoreo para políticas verdes.
- **Coordinación y colaboración internacional:** es clave para aprovechar experiencias y tecnologías desarrolladas en otros países que ya han avanzado en la implementación de políticas de Química Verde. Esto implica la participación activa en foros internacionales, la adopción de mejores prácticas globales y la adaptación de estas al contexto local chileno. Por otro lado, considerando que Chile es miembro de diversas organizaciones internacionales, como la OCDE y la ONU, que promueven la sostenibilidad, se pueden aprovechar estas conexio-

nes para transferir conocimientos y tecnologías que aceleren la implementación de la Química Verde. Además, la coordinación internacional puede facilitar el acceso a financiamiento global, como el Fondo Verde para el Clima, que apoya proyectos de sostenibilidad en países en desarrollo. Chile ha firmado acuerdos internacionales como el Acuerdo de París, y se mantiene activo en la Alianza del Pacífico y otros foros regionales. Integrar los principios de Química Verde en estos acuerdos y utilizar la cooperación internacional para implementar políticas y tecnologías sostenibles puede posicionar al país como un líder en la región en términos de sostenibilidad. Cabe destacar que esta propuesta justamente avanza en la política pública relacionada con la coordinación mencionada en el marco conceptual de la sección 3.2 de este documento.

5.2 Propuestas específicas para Chile

- **Incentivos tributarios:** utilizar políticas de impuestos y subsidios fiscales para corregir externalidades negativas de la química tradicional y promover la adopción de prácticas de Química Verde. Cabe notar que la implementación de estas políticas requiere de cálculos para cuantificar los daños y beneficios de diferentes procesos químicos. En concreto se puede pensar en impuestos verdes similares a las políticas tributarias de Alemania. Al mismo tiempo, para incentivar la sustitución hacia productos que aplican QV, es posible utilizar subsidios para procesos que incorporen tecnologías limpias, siguiendo el ejemplo de Canadá.
- **Prohibición de tecnologías contaminantes:** adoptar medidas regulatorias para prohibir el uso de tecnologías altamente contaminantes y promover la transición hacia alternativas sostenibles.
- **Entrega de información:** este es un elemento central donde se busca mejorar la disponibilidad y acceso de información relacionada con la Química Verde para productores y consumidores. En particular, se podría pensar en medidas del tipo etiquetado y Sellos Verdes, tal como el modelo de Holanda con la biotecnología industrial. Asimismo, se propone la difusión sobre normativas, sobre el cumplimiento de estándares internacionales como ISO para productos y procesos químicos, entre otros. Finalmente, campañas de difusión sobre los beneficios y

prácticas de la Química Verde, destacando casos de éxito tanto nacionales como internacionales. Esto es importante para favorecer la transición a nuevos procesos y de esa manera aminorar efectos negativos en empleo y dimensiones sociales, además de la relevancia que conlleva en una economía abierta como la chilena.

- **Incentivos a la colaboración en QV:** fomentar la colaboración entre el sector privado y científico para la transferencia de conocimientos y tecnologías, a través de incentivos similares a los de Canadá.
- **Promoción de QV en la formación de capital humano:** desarrollar el capital humano necesario para la transición hacia la QV mediante programas educativos y de capacitación en diferentes niveles y ámbitos. Incorporación de QV en planes de estudio en educación media (con especial foco en la educación técnico profesional) y superior. Asimismo, desarrollar programas de capacitación continua para personas que trabajan en el sector químico, de salud y agricultura, siguiendo el ejemplo de promoción de capital humano en Alemania y Canadá.

6. Conclusiones, proyecciones y recomendaciones

En conclusión, la adopción de los principios de Química Verde no solo representa una oportunidad crucial para mitigar los impactos ambientales negativos de los desarrollos industriales, científico y tecnológicos y mejorar la salud pública, sino que también abre la puerta a una serie de beneficios socioeconómicos significativos, incluyendo la creación de empleos verdes y el impulso a la innovación sostenible. Proyectamos que la integración de la QV en las estrategias nacionales de desarrollo podría posicionar a Chile como líder en sostenibilidad y tecnología verde, alineándose con las tendencias globales hacia economías más limpias y resilientes. Recomendamos la implementación de una Política Nacional de Química Verde (PNQV) que coordine esfuerzos interministeriales, fomente la investigación y desarrollo, y promueva la educación y capacitación en Química Verde. Además, es crucial incentivar la colaboración público-privada y asegurar un marco normativo robusto que facilite la transición hacia prácticas más sostenibles. Con estos pasos, Chile puede no solo cumplir con sus objetivos de desarrollo sostenible, sino también catalizar un cambio positivo en la industria química global.

Referencias

- Agro Chemistry** (2024). Greening chemistry gets broad support from political parties in the Netherlands. Disponible en: <https://www.agro-chemistry.com/news/greening-chemistry-gets-broad-support-from-political-parties-in-the-netherlands/>
- Anastas, P.T. y Eghbali, N.** (2010). Green Chemistry: Principles and Practice, *Chemical Society Reviews*, 39(1), pp. 301-312. Disponible en: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2010/cs/b918763b>
- Anastas, P.T. y Warner, J.C.** (1998). *Teoría y práctica de la química verde*. New York: Oxford University Press.
- ASCC** (2024). *Acuerdos de Producción Limpia (APL)*. Disponible en: <https://www.ascc.cl/pagina/apl>
- Banco Mundial** (2023). Valor agregado de las industrias químicas (% del valor agregado manufacturero) - Chile. Disponible en: <https://datos.bancomundial.org/indicador/NV.MNF.CHEM.ZS.UN>
- Barahona, N., Gallego, F. y Montero, J.P.** (2020). Vintage-Specific Driving Restrictions, *The Review of Economic Studies*, 87(4), pp. 1646-1682. Disponible en: https://econpapers.repec.org/article/ouprestud/v_3a87_3ay_3a2020_3ai_3a4_3ap_3a1646-1682.htm
- Bhushan, B.** (2018). *Biomimetics: Bioinspired Hierarchical-Structured Surfaces for Green Science and Technology*. 3ra ed. Cham: Springer. Disponible en: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-71676-3>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile** (2024). Ley 20.780 sobre reforma tributaria. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1010668>
- BioEconomía** (2023). Icónico complejo de química verde de Alemania se abastecerá de electricidad, vapor y gases industriales neutros en carbono. Disponible en: <https://www.bioeconomia.info/2023/09/15/iconico-complejo-de-quimica-verde-de-alemania-se-abastecera-de-electricidad-vapor-y-gases-industriales-neutros-en-carbono/>
- Brightsite Center** (2024a). Green chemistry: new economy calls on the Dutch Parliament to continue circular policy. Disponible en: <https://brightsitecenter.com/green-chemistry-new-economy-calls-on-the-dutch-parliament-to-continue-circular-policy-dutch-only/>
- Brightsite Center** (2024b). Politieke partijen voor versnelde verduurzaming chemie. Disponible en: <https://brightsitecenter.com/politieke-partijen-voor-versnelde-verduurzaming-chemie/>
- ChemistryNL** (2024). Growth Fund Initiatives. Disponible en: <https://chemistrynl.com/en/growth-fund-initiatives/>
- D'Haultfoeuille, X., Givord, P. y Boutin, X.** (2014). The environmental effect of green taxation: the case of the French Bonus/Malus, *The Economic Journal*, 124(578), pp. F444-F480.
- Ellen MacArthur Foundation** (2024). Circular Economy Introduction: Overview. Disponible en: <https://www.ellen-macarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>
- ESG Hoy** (2024). Alemania aplica novedosa herramienta para incentivar reducción de CO2 en industrias con uso intensivo de energía. Disponible en: <https://www.esghoy.cl/alemania-aplica-novedosa-herramienta-para-incentivar-reduccion-de-co2-en-industrias-con-uso-intensivo-de-energia/>
- Estay, P.** (2021). ODS 12: Producción y consumo sostenible en Chile. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Disponible en: https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32482/1/ODS_12_Produccion__n_y_consumo_sostenible_en_Chile.pdf
- Government of the Netherlands** (2024). The Netherlands, France, the Czech Republic, and Ireland call for a European policy package on sustainable carbon in the chemical industry. Disponible en: <https://www.government.nl/latest/news/2024/04/16/the-netherlands-france-the-czech-republic-and-ireland-call-for-a-european-policy-package-on-sustainable-carbon-in-the-chemical-industry>
- GreenCentre Canada** (2024). About Us. Disponible en: <https://greencentrecanada.com/>
- Groene Chemie** (2024). Home. Disponible en: <https://groenechemie.nl/>
- Gruber, J.** (2015). *Public finance and public policy*. 5ta ed. New York: Worth Publishers.
- Health Canada** (2024). Options for advancing informed substitution and alternatives assessment under the Canada Chemicals Program. Disponible en: <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/chemical-substances/consulting-future-chemicals-management-canada/options-advancing-informed-substitution-alternatives-assessment-canada-chemicals-program.html>
- Ilieva, L., Ursano, I., Traista, L., Hoffmann, B. y Dahy, H.** (2022). Biomimicry as a Sustainable Design Methodology-Introducing the 'Biomimicry for Sustainability' Framework, *Biomimetics*, 7(2), pp. 37.
- Islam, T., Repon, M.R., Islam, T., Sarwar, Z. y Rahman, M.M.** (2023). Impact of textile dyes on health and ecosystem: A review of structure, causes, and potential solutions, *Environmental Science and Pollution Research*, 30(4), pp. 9207-9242.
- Lebdioui, A.** (2022). Nature-inspired innovation policy: Biomimicry as a pathway to leverage biodiversity for economic development, *Ecological Economics*, 202, pp. 107585.
- Leuphana University** (2024). Sustainable Chemistry. Disponible en: https://www.leuphana.de/en/professional-school/masters-studies/sustainable-chemistry.html?utm_source=Keystone&utm_medium=referral&utm_campaign=keystone-portale-schem

- Madera Sostenible** (2024). Canadá pone el foco en los proyectos sobre bioenergías y biocombustibles, química verde y nuevos biomateriales de origen forestal y maderero. Disponible en: <https://madera-sostenible.com/forestal/canada-pone-el-foco-en-los-proyectos-sobre-bioenergias-y-biocombustibles-quimica-verde-y-nuevos-biomateriales-de-origen-forestal-y-maderero/>
- Meyer, D.E. y Gonzalez, M.A.** (2014). The economics of green and sustainable chemistry, en Marteel-Parrish, A.E. y Abraham, M.A. (eds.), *Green chemistry and engineering: A pathway to sustainability*. New York: John Wiley & Sons, Inc., pp. 287-323.
- Mulvihill, M.J., Beach, E.S., Zimmerman, J.B. y Anastas, P.** (2011). Green Chemistry and Green Engineering: A Framework for Sustainable Technology Development, *Annual Review of Environment and Resources*, 36(36), pp. 271-293.
- Ncube, A., Mtetwa, S., Bukhari, M., Fiorentino, G. y Passaro, R.** (2023). Circular Economy and Green Chemistry: The Need for Radical Innovative Approaches in the Design for New Products, *Energies*, 16(4), pp. 1752.
- Noce, A.M.** (2017). 25 years of green chemistry, *Chemical & Engineering News*, 95(28). Disponible en: <https://cen.acs.org/articles/95/i28/25-years-green-chemistry.html>
- NWO** (2024). Five projects starting in Dutch-German programme on green chemistry. Disponible en: <https://www.nwo.nl/en/news/five-projects-starting-in-dutch-german-programme-on-green-chemistry>.
- OCDE** (2011). *Towards Green Growth, Summary in Spanish*. Disponible en: <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/9789264111318-sum-es.pdf?expires=1730320919&id=id&accname=guest&checksum=A-041DOBA1C865F17C2EAB2124A11890E>
- ONU** (2015). *Paris Agreement*. Disponible en: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf
- ONU** (2019). *The Future is Now: Science for Achieving Sustainable Development. Global Sustainable Development Report 2019*. Disponible en: <https://sdgs.un.org/publications/future-now-science-achieving-sustainable-development-gsr-2019-24576>
- ONU** (2023). *Special Edition: Progress towards the Sustainable Development Goals*. Disponible en: <https://hlpf.un.org/sites/default/files/2023-04/SDG%20Progress%20Report%20Special%20Edition.pdf>
- ONU** (2024). *Sustainable Development Report: Chile*. Disponible en: <https://dashboards.sdgindex.org/profiles/chile>
- PV Magazine México** (2023). Canadá formaliza un crédito fiscal del 30% durante seis años entre otros incentivos a la energía limpia. Disponible en: <https://www.pv-magazine-mexico.com/2023/03/31/canada-formaliza-un-credito-fiscal-del-30-durante-seis-anos-entre-otros-incentivos-a-la-energia-limpia/>
- Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S.E., Donges, J.F., Drüke, M., Fetzer, I., Bala, G., Rockström, J. y otros** (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries, *Science Advances*, 9(37). Disponible en: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adh2458>
- Sachs, J.D., Lafortune, G. y Fuller, G.** (2024). *The SDGs and the UN Summit of the Future. Sustainable Development Report 2024*. Paris: SDSN, Dublin: Dublin University Press. doi:10.25546/108572
- SAG** (2024). *Acuerdos de Producción Limpia (APL)*. Disponible en: <https://www.sag.gob.cl/ambitos-de-accion/acuerdos-de-produccion-limpia-apl>.
- Silvestri, C., Silvestri, L., Forcina, A., Di Bona, G. y Falcone, D.** (2021). Green chemistry contribution towards more equitable global sustainability and greater circular economy: A systematic literature review, *Journal of Cleaner Production*, 294, pp. 126137.
- Tatsachen über Deutschland** (2024a). Tecnología verde: Un sector con futuro. Disponible en: <https://www.tatsachen-ueber-deutschland.de/es/clima-y-energia/tecnologia-verde-un-sector-con-futuro>
- Tatsachen über Deutschland** (2024b). La transición energética. Disponible en: <https://www.tatsachen-ueber-deutschland.de/es/clima-y-energia/la-transicion-energetica>
- TNO** (2024). Green Chemistry. Disponible en: <https://www.tno.nl/en/about-tno/organisation/units/strategic-analysis-policy/strategic-business-analysis/green-chemistry/>
- University of Groningen** (2024). Green Chemistry Community. Disponible en: <https://www.rug.nl/about-ug/profile/facts-and-figures/duurzaamheid/nieuws/green-chemistry-community?lang=en>
- University of Toronto** (2024a). Focus: Green Chemistry. Disponible en: <https://www.chemistry.utoronto.ca/programs-studies/focus-green-chemistry>
- University of Toronto** (2024b). Green Chemistry Initiative. Disponible en: <https://www.greenchemistry.ca/>
- Utrecht University** (2024). Institute for Sustainable and Circular Chemistry. Disponible en: <https://www.uu.nl/en/research/institute-for-sustainable-and-circular-chemistry/education>

CÓMO CITAR ESTA PUBLICACIÓN:

Zacconi, F., Gallego, F., Pabón, C., y Ratjen, L. (2024). Química Verde y políticas públicas: actualidad, desafíos y propuestas para un futuro sustentable. *Temas de la Agenda Pública*, 19(179), 1-16. Centro de Políticas Públicas UC.

Centro UC

Políticas Públicas



www.politicaspUBLICAS.uc.cl
politicaspUBLICAS@uc.cl



SEDE CASA CENTRAL

Av. Libertador Bernardo O'Higgins 340, piso 3, Santiago.
Teléfono (56) 2 2354 6637.



SEDE EDIFICIO PATIO ALAMEDA

Av. Libertador Bernardo O'Higgins 440, piso 12, Santiago.
Teléfono (56) 2 2354 5658.