



LA LIMPIEZA CRIOGÉNICA EN PATRIMONIO CULTURAL

Hacia nuevos métodos sostenibles y respetuosos con el medio ambiente

Alumno/a : Aina Vega Bosch

Tutores/as : Virginia Santamarina Campos
Ángela Carabal Montagud
Antoni Colomina Subiela



UNIVERSITAT
POLITÀCNICA
DE VALÈNCIA



departamen
Conservació
Restauració
Bens
Culturals



Conservación
y Restauración
de Bienes
Culturales
Máster
Universitario
UPV

Índice

1. INTRODUCCIÓN	8
2. OBJETIVOS	14
3. METODOLOGÍA	18
4. ESTADO DE LA CUESTIÓN	20
5. ESTUDIO DE LOS MÉTODOS ACTUALES	24
5.1 FUNCIONAMIENTO DE LOS DIFERENTES MÉTODOS DE LIMPIEZA	24
5.2 COMPARACIÓN MÉTODOS DE LIMPIEZA	39
6. ANÁLISIS DE LA LIMPIEZA CRIOGÉNICA	44
6.1 FUNCIONAMIENTO DE LA LIMPIEZA CRIOGÉNICA	45
6.2 REVISIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS DISPONIBLES EN EL MERCADO	49
6.3 REVISIÓN DE LOS SECTORES INDUSTRIALES QUE SE EMPLEA. CARACTERÍSTICAS DE LAS MÁQUINAS EN FUNCIÓN DE LOS USOS	60
6.4 REVISIÓN DE LOS USOS Y APLICACIÓN EN EL ÁMBITO DE LA RES- TAURACIÓN DE PATRIMONIO	64
7. PROPUESTAS DE APLICACIÓN Y MEJORAS DEL MÉTODO	74
8. CONCLUSIONES	78
9. BIBLIOGRAFÍA	80
10. ÍNDICE DE IMÁGENES	88

Resumen

En el presente trabajo de investigación se recoge un análisis sobre las tendencias en investigación y aplicación de la limpieza criogénica como tratamiento eficiente y sostenible en el sector tecnológico, alimentario e industrial, para su posible incorporación en el campo de la conservación del patrimonio cultural. Esta técnica de limpieza se caracteriza por ser inocua para el operador y no requerir lavados posteriores o tiempos de evaporación a causa de la retención de los disolventes. La introducción de la limpieza criogénica a los requerimientos de la profesión resulta un recurso innovador, lleno de beneficios para el ámbito de la conservación y restauración, además de contribuir con los Objetivos y Metas de Desarrollo Sostenible que presentó la Organización de las Naciones Unidas para el próximo 2030.

La búsqueda de nuevos sistemas de limpieza inocuos para la obra y el operador que la interviene, se ha convertido en una vía de investigación prioritaria y de suma importancia para el sector patrimonial. La inclusión de sistemas de limpieza gelificados, mixtos y acuosos, incorporó nuevos parámetros de medición que permitían elaborar protocolos de limpieza más efectivos y menos nocivos. No obstante, el desarrollo de Solvent Gel y sistemas emulsionados, impulsó consigo la investigación de soluciones alternativas que, a su vez, remediasen la problemática asociada al residuo no volátil depositado en las superficies, fruto del uso de tensoactivos y compuestos gelificantes.

De este modo, herramientas, productos y tratamientos diseñados para otros sectores, han sido habitualmente reaprovechados por los restauradores, con el fin de reducir las limitaciones técnicas de nuestras intervenciones e introducir alternativas ante las necesidades que puedan identificarse en el bien patrimonial y los operadores que aseguran su perdurabilidad.

Toda contribución dirigida a conseguir dicho objetivo, permitirá avanzar en la senda hacia una restauración más segura, ecológica y sostenible, reduciendo la peligrosidad que llevan consigo algunas intervenciones que atentan contra nuestra salud y la perdurabilidad de los materiales patrimoniales sobre las que se acomete.

Palabras Clave

Agenda 2030
 Objetivos de Desarrollo Sostenible;
 ODS 7; ODS 8; ODS 9; ODS 12; ODS 13;
 Limpieza criogénica;
 Sostenibilidad;
 Innovación;
 Energía cinética;
 Energía térmica;
 Sublimación;
 Conservación y restauración;
 Patrimonio cultural;
 Procesos de limpieza.

Abstract

This research work includes an analysis of the trends in research and application of dry ice blasting as an efficient and sustainable treatment in the technological, food and industrial sector with a view to its possible incorporation in the field of cultural heritage conservation.

The introduction of dry ice blasting to the requirements of the profession is an innovative resource, full of benefits for the field of conservation and restoration, in addition to contributing to the Sustainable Development Goals presented by the United Nations Organization for the next 2030.

The discovery of new cleaning systems that are harmless for the work and the operator, has become a priority research path and hugely important for the heritage sector. The inclusion of gelled, mixed and aqueous cleaning systems incorporated new measurement parameters that allowed the development of more effective and less harmful cleaning protocols. However, the development of Solvent Gel and emulsified systems led to the research of alternative solutions that remedied the problems associated with the non-volatile residue, which is deposited on surfaces after the use of surfactants and gelling compounds.

In this way, tools, products and treatments designed for other sectors have usually been reused by restorers in order to reduce the technical limitations of our interventions. The aim is to introduce alternatives to the needs that can be identified in the heritage property and the operators that ensure its durability.

Any contribution aimed at achieving this objective will allow us to advance on the path towards a safer, more ecological and sustainable restoration, reducing the danger associated with some interventions that threaten our health and the durability of the heritage materials.

Key words

Agenda 2030;
Sustainable Development Goals;
SDG 7; SDG 8; SDG 9; SDG 12; SDG 13;
Dry Ice Blasting;
Sustainability;
Innovation;
Kinetic energy;
Thermal energy;
Sublimation;
Conservation and restoration;
Cultural heritage;
Cleaning processes.

1

Introducción



La incorporación de la limpieza criogénica como alternativa a otros sistemas de limpieza en el ámbito de la conservación y restauración del patrimonio cultural, supone una acción comprometida con la Agenda 2030. La criolimpieza surge en 1985 en Estados Unidos como patente diseñada y desarrollada por la empresa Cold Jet (Cotec, 2010). Se trata de un sistema inocuo para el planeta, siendo fácilmente transportable y aplicable a infinidad de estratos, sin comprometer los materiales subyacentes originales (Spur et al., 1999).

De este modo, la limpieza criogénica contribuye a "garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos" [ODS 7], al sumar una alternativa tecnológica innovadora, sostenible, eficiente y económica al abanico de técnicas de limpieza [ODS 7.3.b]. También incita a "promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos" [ODS 8], además de alentar a "construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación" [ODS 9]; de la misma forma, que coopera por "garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles" [ODS 12], al reconvertir subproductos derivados de procesos industriales en pellets de CO₂ proyectable, evitando el desperdicio energético con propuestas de consumo y reaprovechamiento innovador y sostenible [ODS 8.4, 9.4, 9.5.b, 12.2]. Al no generar residuo secundario, permite una gestión ecológica de uso y reducción de desechos, incorporando prácticas medioambientalmente favorables en las labores de restauración [ODS 12.4, 12.5, 12.6]. Por último, reconoce "adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos" [ODS 13], al tratarse de un proyecto de investigación vinculado a una titulación universitaria, aproximando la sensibilización medioambiental a las aulas y departamentos de la institución [13.3] (Asamblea General de las Naciones Unidas, 2015).

La propuesta de diseño, difusión y participación de la Organización de las Naciones Unidas para la Agenda de Desarrollo Sostenible 2030, recoge las experiencias pasadas sobre la elaboración e implantación de directrices colaborativas globales. En esta nueva agenda se pretende trazar una estrategia interseccional efectiva desde la cooperación por el bien común.

Sobre la Agenda 2030, se localizan las primeras influencias en el año 2000. Ese mismo año, líderes mundiales se reunieron en las Naciones Unidas con el fin de diseñar un plan de acción contra la pobreza extrema, el hambre, la brecha de género, facilitar la escolarización de más niñas y promover la protección medioambiental. En dicha convención, se definieron ocho Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), estableciéndose como el marco de desarrollo global predominante en los siguientes 15 años. En los ODM se priorizaron a las personas y sus necesidades inmediatas, sin obviar la sólida correlación entre las dimensiones económicas, sociales y medioambientales. La participación en los ODM incluía tanto países desarrollados como países en desarrollo, con el fin de fomentar la cooperación y alianzas entre comunidades (ONU, 2015a).

Tres lustros después de la inclusión y movilización de los Objetivos de Desarrollo del Milenio en la gestión política de los países vinculados, se generó un informe técnico de evaluación del cumplimiento de dichos objetivos. En él se estudiaron punto por punto las líneas verdes de desarrollo y los aspectos limitantes, encontrando una mejora en todas las dimensiones involucradas. No obstante, seguía habiendo carencias y restricciones para alcanzar las metas propuestas, obligando al comité a realizar una exhaustiva revisión del movimiento. El estudio del impacto de los ODM, cambió el foco de las estrategias de desarrollo. Los esfuerzos por erradicar la pobreza y facilitar el desarrollo económico inclusivo e igualitario, no podían reformularse sin priorizar la sostenibilidad ambiental. Afirmaron que "el cambio climático y la degradación ambiental socavan el progreso logrado, y las personas pobres son quienes más sufren" (ONU, 2015a). Estudios indicaban que desde 1990 hasta 2012 se había producido un incremento superior al 50% en las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. El aumento de las emisiones no ha sido progresivo, se registró una subida del 10% entre 1990 y el cambio de milenio, triplicándose en la siguiente década hasta el 38%.

Esta carrera a contrarreloj desafía a la comunidad global para hacer frente al impacto que el cambio climático tendrá en la conservación de los ecosistemas, las fluctuaciones climatológicas extremas y las consecuencias socioeconómicas que ello conlleva (ONU, 2015a).

En diciembre de ese mismo año, se formuló un acuerdo jurídico vinculante en la conferencia de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Desde París, se sostuvo la necesidad de proporcionar un marco de acción global cuyo único objetivo fuese la mitigación del cambio climático. Protocolos anteriores como el Relativo a las Sustancias que Agotan la Capa de Ozono, acordado en Montreal en 1987, han sido mundialmente ratificados por su importante contribución para la recuperación de la capa de ozono, estimada para mediados de siglo (ONU, 2015a); cuya labor abarca desde la reducción de gases de efecto invernadero hasta la erradicación de sustancias que la disminuyan.

Asentada sobre las nuevas bases medioambientales, Naciones Unidas formuló la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible tomando como pilar fundamental la inclusión del medioambiente en las ambiciones de desarrollo (ONU, 2015a). Vinculada a las directrices del Acuerdo de París (2015) y la Agenda de Acción de Addis Abeba para el Financiamiento del Desarrollo (2015), pretende retomar la labor de los ODM, proponiendo diecisiete objetivos (Fig. 1) y ciento sesenta y nueve metas nuevas en favor de las "5P": las Personas (People), la Prosperidad (Prosperity), las Alianzas (Partnerships), la Paz (Peace) y el Planeta (Planet) (Asamblea General de las Naciones Unidas, 2015).

La trascendencia e interés depositados en la Agenda 2030, deben sostenerse con la financiación y predisposición adecuados para activar la investigación científica, tecnológica y de innovación por el desarrollo sostenible (ONU, 2015a). En ella quedan involucrados todos los sectores de desarrollo económico, incluyendo el sector cultural. El cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Fig. 2) requiere de la participación de la conservación y restauración de bienes culturales, fomentando la inclusión de estrategias sostenibles en las prácticas de salvaguarda patrimonial.



Fig. 1 Objetivos de Desarrollo Sostenible. Fuente: Fundación Europea Sociedad y Educación, 2021.

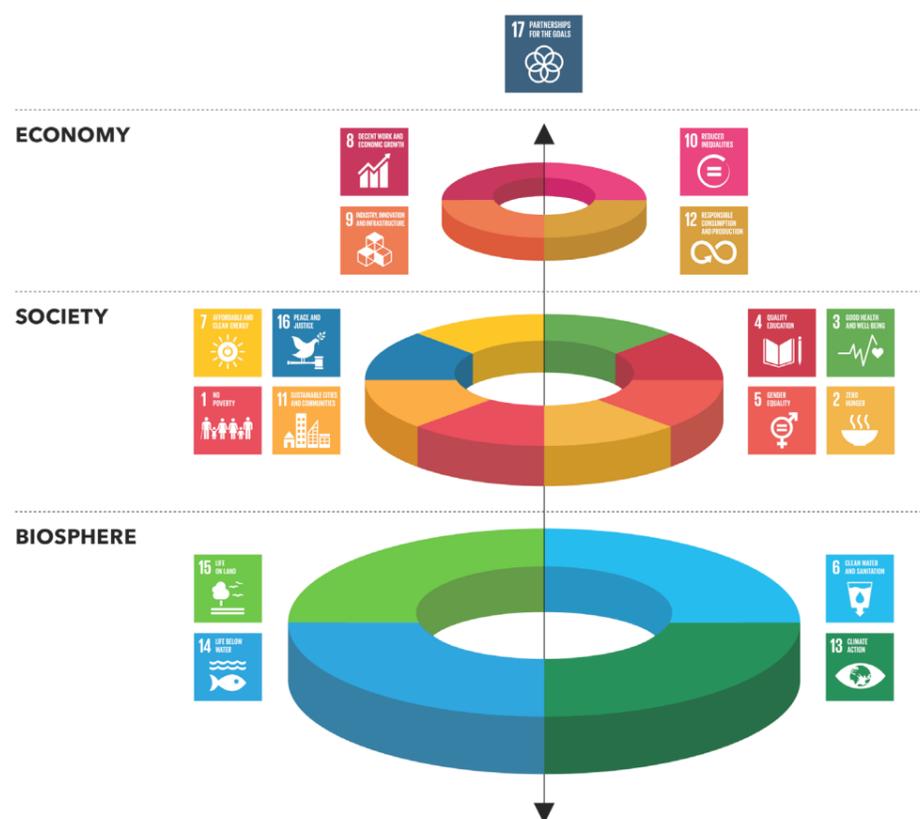


Fig. 2 Esferas de intervención de los ODS. Fuente: Mark Irvine, 2016.

La incorporación de la limpieza criogénica en el ámbito de la conservación y restauración no solamente contribuye a la sostenibilidad, sino que también supone un avance técnico dentro de las metodologías aplicadas a la remoción de estratos indeseados. La innovadora combinación de energía cinética, energía térmica y sublimación del material proyectado, incorpora una nueva herramienta de limpieza mecánica inocua, sin riesgo de abrasión ni residuo secundario. Su aplicación en el ámbito de la conservación y restauración encuentra solvencia en la eliminación de polímeros sintéticos sobre muros y recubrimientos cerosos aplicados en matrices metálicas, además de restos de hollín y conglomerados de polvo medioambiental sobre colecciones bibliográficas. No obstante, faltan estudios específicos que respalden su aplicación en otras superficies y optimicen la aplicación del método, con el fin de asegurar el uso responsable y prudente de la herramienta.

Los principales referentes teóricos surgen de la industria tecnológica, automovilística y aeroespacial, sirviéndose de la proyección de hielo seco para la limpieza de circuitos eléctricos, la preparación de superficies y aplicación de recubrimientos o esterilización de cabinas aeronáuticas. La criolimpieza permite la intervención sobre componentes conductores de electricidad, debido a la intervención en seco de los micropellets. El rango de aplicabilidad no ha encontrado limitación en el tamaño de partícula, pudiendo aplicarse como medio de desinfección de superficies. Estas y otras aplicaciones más comunes de la limpieza criogénica industrializada, aportan información sobre la valoración de propuestas de aplicación del sistema en la conservación del patrimonio, a expensas de someterse a experimentación y estudio cuantitativo para su completa validación.

La introducción de nuevos métodos en nuestra profesión supone un reto. Toda inclusión debe atender a unos requerimientos básicos para la aplicación del sistema sobre bienes patrimoniales. El cumplimiento de los requisitos fundamentales demanda un profundo análisis con el que identificar cada una de las partes que intervienen en el resultado, ya que las piezas sobre las que va a ser aplicado deben permanecer intactas. Esto implica niveles de estudio y optimización muy avanzados, enfocados en nuestra profesión y las necesidades que se plantean. Se prevé el alcance de esos niveles en futuras investigaciones sobre la limpieza criogénica aplicada a bienes culturales, debido a las extraordinarias características con las que fascina a otros sectores y los excelentes resultados que se han obtenido en las intervenciones que hasta ahora se han llevado a cabo sobre bienes patrimoniales.

2

Objetivos



El **OBJETIVO GENERAL** del presente trabajo es proponer la limpieza criogénica como alternativa inocua, innovadora y sostenible a los sistemas de limpieza empleados en restauración con problemática derivada del residuo, la toxicidad y la retención.

Los **OBJETIVOS ESPECÍFICOS** se centrarán en:

- Reducir la toxicidad en las intervenciones de limpieza de bienes patrimoniales a través de la incorporación de alternativas sostenibles en el abanico de métodos disponibles.
- Adaptar y optimizar la limpieza criogénica para una aplicación selectiva, precisa y eficiente.
- Difundir los resultados obtenidos con la finalidad de abrir una línea de investigación que aporte nuevas vías de desarrollo en el estudio de sistemas de limpieza ecológicos y sostenibles.
- Aplicar y cumplir con los ODS a través de la propuesta de incorporación de la limpieza criogénica en el ámbito patrimonial.
- Fomentar y promover los ODS como un tema de investigación dentro de la universidad.

Enmarcada en la Agenda de Desarrollo Sostenible diseñada por la Organización de las Naciones Unidas para el año 2030, la investigación se vincula a diez de las ciento sesenta y nueve metas definidas, insertas en los objetivos siete, ocho, nueve, doce y trece (Fig. 3) de los diecisiete que se proponen (ONU, 2015b).

OBJETIVO 7. Garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos.

7.3 De aquí a 2030, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética

7.3.b De aquí a 2030, ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para prestar servicios energéticos modernos y sostenibles para todos en los países en desarrollo, en particular los países menos adelantados, los pequeños Estados insulares en desarrollo y los países en desarrollo sin litoral, en consonancia con sus respectivos programas de apoyo

OBJETIVO 8. Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos

8.4 Mejorar progresivamente, de aquí a 2030, la producción y el consumo eficientes de los recursos mundiales y procurar desvincular el crecimiento económico de la degradación del medio ambiente, conforme al Marco Decenal de Programas sobre Modalidades de Consumo y Producción Sostenibles, empezando por los países desarrollados.

OBJETIVO 9. Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación.

9.4 De aquí a 2030, modernizar la infraestructura y reconvertir las industrias para que sean sostenibles, utilizando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de tecnologías y procesos industriales limpios y ambientalmente racionales, y logrando que todos los países tomen medidas de acuerdo con sus capacidades respectivas.

9.5 Aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales de todos los países, en particular los países en desarrollo, entre otras cosas fomentando la innovación y aumentando considerablemente, de aquí a 2030, el número de personas que trabajan en investigación y desarrollo por millón de habitantes y los gastos de los sectores público y privado en investigación y desarrollo.

9.5.b Apoyar el desarrollo de tecnologías, la investigación y la innovación nacionales en los países en desarrollo, incluso garantizando un entorno normativo propicio

a la diversificación industrial y la adición de valor a los productos básicos, entre otras cosas.

OBJETIVO 12. Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles.

12.2 De aquí a 2030, lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales

12.4 De aquí a 2020, lograr la gestión ecológicamente racional de los productos químicos y de todos los desechos a lo largo de su ciclo de vida, de conformidad con los marcos internacionales convenidos, y reducir significativamente su liberación a la atmósfera, el agua y el suelo a fin de minimizar sus efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente

12.5 De aquí a 2030, reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización

12.6 Alentar a las empresas, en especial las grandes empresas y las empresas transnacionales, a que adopten prácticas sostenibles e incorporen información sobre la sostenibilidad en su ciclo de presentación de informes.

OBJETIVO 13. Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.

13.3 Mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación del cambio climático, la adaptación a él, la reducción de sus efectos y la alerta temprana (Asamblea General de las Naciones Unidas, 2015).



Fig. 3 Objetivos de Desarrollo Sostenible vinculados a la investigación.

Fuente: Fundación Europea Sociedad y Educación, 2021..

3

Metodología



La metodología empleada será el **ESTUDIO DE FUENTES DOCUMENTALES** (INFORMACIÓN SECUNDARIA), concretamente el análisis de las fuentes bibliográficas, a través de la consulta de los diferentes textos publicados sobre el tema en libros, actas de congresos, revistas especializadas, periódicos, monografías, memorias, registros videográficos, etc., con el fin de determinar el marco teórico de la cuestión, tanto a nivel nacional como a escala europea e internacional. Habrá que estudiar específicamente tanto sector tecnológico, alimentario e industrial, como el sector patrimonial.

El **PLAN DE TRABAJO** planteado será:

- 1º. Localización de los archivos y recopilación de la información de interés consultada en ellos.
- 2º. Organización del conjunto de documentos recopilados.
- 3º. Primer ejercicio crítico, analítico e interpretativo.
- 4º. Definición del marco teórico.
- 5º. Análisis e interpretación.
- 6º. Propuesta de aplicación y elaboración de conclusiones.

4

Estado de la cuestión



El proceso de limpieza es uno de los tratamientos más delicados, controvertidos e invasivos de un proceso de restauración y su intervención sobre la pieza no debería ser nociva, acelerando o provocando futuros problemas de conservación (UNE-EN 17138, 2019). Nos referimos a la limpieza de bienes culturales como proceso que incluye la eliminación o adelgazamiento de estratos alterados o materiales indeseados depositados sobre la obra a lo largo de su existencia. Entendiendo que se trata de una intervención de tipo estético, este tratamiento no pretende poner en riesgo o alterar las propiedades físico-mecánicas de la superficie a conservar, es más, su irreversibilidad requiere máxima prudencia y responsabilidad (Colomina et al., 2020). La definición terminológica conlleva una pausa analítica, entendiendo por tanto que existen dos tipologías de limpieza, la empleada como tratamiento de superficie, mediante la eliminación de depósitos acumulados, o la planteada como medio de eliminación de estratos. La primera, tratará de conservar intacto el estrato, mientras que la segunda conlleva la eliminación de material filmógeno (Paolo Cremonesi, 2014).

Aspectos como el brillo, la saturación o el tono, son macroscópicamente evaluables con técnicas de análisis no invasivas, mientras que la alteración en la estructura polimérica y topográfica del material requiere de estudios de extracción de muestra y sistemas analíticos microscópicos más complejos. Todos los factores, incluyendo el acceso a los medios de asistencia para la evaluación de la limpieza, intervienen en la elección del medio más adecuado, entramando un amplio mapa que guiará en la compleja toma de decisiones.

La limpieza de pinturas contemporáneas sin estrato de protección o barniz, incrementa la complejidad del tratamiento. Se han realizado numerosos estudios respecto a métodos de limpieza físicos, fisicoquímicos, químicos, mecánicos y biológicos, como los sistemas gelificados, jabones, encimas o las soluciones de intercambio iónico, así como el laser, propuestos desde la necesidad de encontrar nuevos sistemas que permitan reducir los riesgos a los que se expone el bien patrimonial durante estos procesos (Laudenbacher, 2010). La lixiviación o extracción de sustancias poliméricas solubles, sigue siendo una línea de investigación abierta; aunque en estos momentos también se sumen los procesos de lavado y eliminación de los residuos no volátiles depositados por el uso de medios gelificados o emulsionados (Casoli et al., 2014; Prati et al., 2018). En ese sentido, la investigación en los procesos de limpieza

trata de plantear alternativas, a través de la adaptación metodológica o inclusión de nuevos métodos, con el fin de alcanzar una coherencia entre los requisitos de la limpieza y los medios con los que se cuenta.

En lo que concierne a los requerimientos o consideraciones aplicables a la elección del sistema de limpieza, la Norma Española UNE-EN 17138:2019, propone lo siguiente:

- a. No debería aumentar la posibilidad de que los componentes químicos reactivos tengan reacciones adversas con los materiales a ser conservados, tanto inmediatamente como en el futuro.*
- b. No debería dejar residuos permanentes o no volátiles en el bien cultural o dentro de él que pudieran ser nocivos o tener la capacidad de cambiar la morfología o el color de la superficie (por ejemplo, eflorescencias, manchas, halos), tanto inmediatamente como en el futuro.*
- c. No debería causar daños físico-mecánicos al bien cultural (incluyendo erosión, pérdida de cohesión, desprendimiento o formación de micro-fisuras, aumento de porosidad).*
- d. Debería respetar la superficie original y acabados, y toda adición posterior de valor artístico o histórico (pintura, patinado, etc.) y/o marcas en la superficie dejadas por las herramientas originales.*
- e. Debería mantener o, si es posible, restaurar el nivel de la topografía superficial comparable a la de la superficie original.*
- f. No debería aplicarse de tal manera que atente a la salud de los usuarios del edificio o trabajadores; por lo tanto, se debe tener en cuenta la posible toxicidad de los productos; así como la posible toxicidad de residuos que requieren ser evacuados a lugares adecuados de almacenamiento.*
- g. Debería minimizar el riesgo de daño a la propiedad individual o pública.*
- h. Requeriría que se tomen las debidas consideraciones en la factibilidad del tratamiento para minimizar los problemas potenciales en la aplicación y eficacia.*

De acuerdo con la normativa, los requisitos planteados pueden clasificarse en relación con la nocividad, efectividad y toxicidad, como cualidades integradas en la propuesta de limpieza. Por un lado, la nocividad se vincula a la interacción del producto y su aplicación sobre el material, tanto morfológica como químicamente. En ese sentido, la selectividad del método jugará un papel fundamental. Los esfuerzos por demostrar el incremento de seguridad en el proceso de limpieza por estratos, quedan reflejados también en la efectividad del tratamiento. Al diferenciar la naturaleza de cada película y diseñar un protocolo de limpieza específico, se obtienen resultados más adecuados. El procedimiento estratificado sostiene una ética conservativa de menor impacto, al facilitar, por ejemplo, la conservación del *film* que se encuentra en contacto directo con la obra, en paralelo a la limpieza superficial o la remoción de barnices modernos y retoques cromáticos. Por último, se repara en la toxicidad del sistema. En este punto se incluye el medio, el operador y la gestión de los residuos que del tratamiento se deriven.

La reducción de la toxicidad en las intervenciones de restauración acaparó la atención de los investigadores desde finales del siglo pasado, con la sistematización de los sistemas acuosos como alternativa a los disolventes orgánicos, desarrollada por Richard Wolbers (Paolo Cremonesi, 2014; Laudenbacher, 2010; Prati et al., 2018). Técnicamente supuso un gran avance, proponiendo alternativas a los efectos de la retención o lixiviación de películas pictóricas. No obstante, también trajo consigo la popularización de tendencias más sostenibles en el avance de la investigación científica, no solo por la innovadora propuesta sino también por el endurecimiento de las leyes sobre uso y distribución de sustancias químicas peligrosas (REACH, 2005). Hasta ese momento, era habitual centrar la propuesta de limpieza en la compatibilidad del soluto y el sustrato, sin atención sobre la protección medioambiental o la exposición del restaurador a los vapores del solvente. El nuevo enfoque de la restauración, no sólo avanza hacia una restauración más sostenible, sino que también promueve la conservación preventiva (Balliana et al., 2016).

El impulso de soluciones químicas innovadoras que traten de reducir o eliminar el uso y producción de sustancias peligrosas con el fin de reducir el impacto medioambiental y los riesgos para la salud de las personas, define la *Green Chemistry* (GC). Surge entre la década de los ochenta y los noventa del siglo XX, estableciéndose en 1991 como una nueva ciencia, incorporada en los programas de actuación gubernamental de Estados Unidos y, posteriormente, Italia, Reino Unido y Japón (Saleh & Hassan, 2021). Desde entonces, el interés por esta tipología de investigación se ha incrementado exponencialmente y sus aplicaciones también se reflejan en el estudio y medición predictiva sobre el calentamiento global y los niveles de contaminación del aire, los *Grand Challenges* del siglo XXI (Maxwell & Benneworth, 2018). La GC se rige por doce principios que enmarcan el desarrollo de nuevas propuestas (Tabla 1): (Anastas & Warner, 1980).

Tabla 1. Principios que enmarcan el desarrollo de nuevas propuestas en base a la *Green Chemistry*.

- | | |
|--|---|
| 1. Prevención | 7. Utilización de materias primas renovables |
| 2. Economía de átomos | 8. Reducir los derivados |
| 3. Síntesis química menos peligrosa | 9. Catálisis |
| 4. Diseño de sustancias químicas más seguras | 10. Diseño para la degradación inocua |
| 5. Disolventes y auxiliares más seguros | 11. Análisis en tiempo real para la prevención de la contaminación |
| 6. Diseño para la eficiencia energética | 12. Química intrínsecamente más segura para la prevención de accidentes |

Fuente: Elaboración propia a partir de Anastas & Warner (1980).

La conservación y restauración de bienes culturales no se queda fuera de esta guía. Durante la última década la investigación científica para la conservación del patrimonio ha acompañado al cumplimiento de 6 de los principios sobre las investigaciones del científico Richard Wolbers para la implantación de *Solvent Gels* o los medios acuosos, proponiendo herramientas para reducir el uso de disolventes y el impacto ecológico de la gestión de los residuos derivados (Gonçalves, 2018). Los esfuerzos por resolver la incógnita y aproximarnos a un equilibrio entre la conservación del objeto patrimonial y la sostenibilidad en las acciones curativas, restaurativas y conservativas, ofrecen constantemente alternativas que permiten transitar hacia una profesión de salvaguarda patrimonial y medioambiental.

5

Estudio de los métodos actuales



La limpieza de bienes patrimoniales cuenta con numerosos métodos ligados a las necesidades, tan particulares, de cada tipo de obra. Entender el funcionamiento y versatilidad de cada sistema, permite establecer protocolos de limpieza más seguros, selectivos y eficientes. A pesar de la idoneidad técnica de la técnica, es importante conocer los riesgos que conlleva su uso y aplicación sobre el bien, con el fin de evaluar correctamente los resultados que de ella puedan obtenerse.

5.1 FUNCIONAMIENTO DE LOS DIFERENTES MÉTODOS DE LIMPIEZA

La siguiente estructura y clasificación para el análisis de los métodos de limpieza más habituales en conservación y restauración, se fundamenta en la caracterización que algunos autores refieren sobre la tipología específica de cada método (Barros, 2005; Colomina et al., 2020; Cremonesi, 2014; Cremonesi & Signorini, 2016; UNE-EN 17138, 2019). La clasificación tradicional de medios físicos, físico-químicos, químicos, mecánicos y biológicos, se ha replanteado con la intención de subdividir las técnicas en categorías independientes, desde las que abarcar una visión global de los métodos más comunes en los procesos de limpieza y referir, en cada caso, cuál es su intervención con el estrato a remover. De este modo, cada agente se ha contenido en sistemas acuosos, medios disolventes, técnicas mecánicas, fotoablación o medios biológicos (Fig. 4). Se describe de cada uno de ellos su acción limpiadora y las aplicaciones más comunes, además de las ventajas y desventajas que le acompañan, como fortalezas y aspectos limitantes de cada sistema.

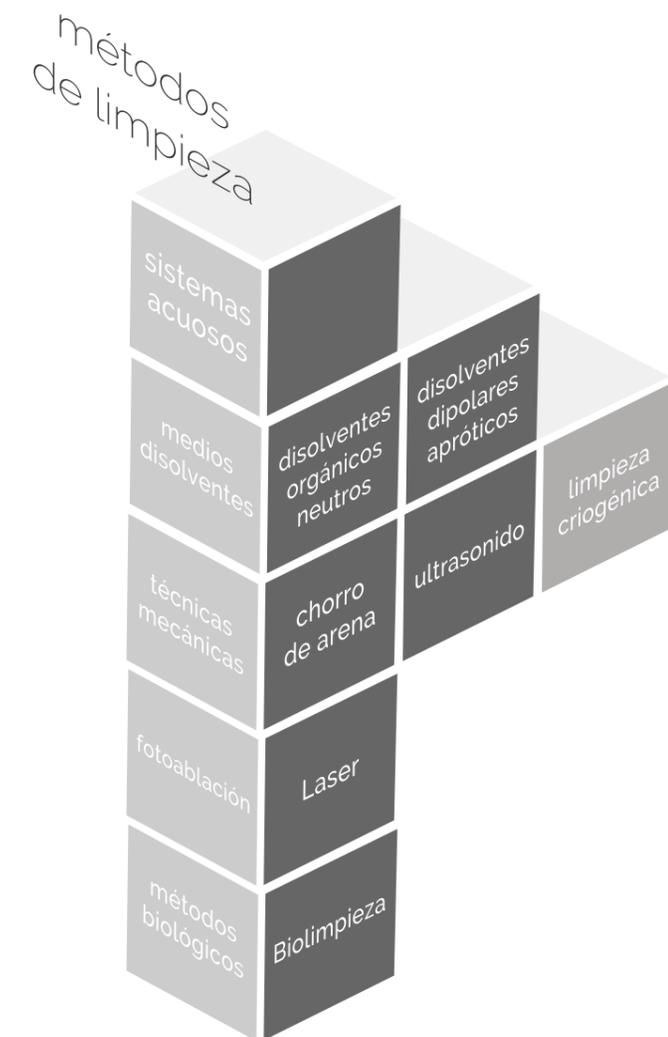


Fig. 4 Clasificación de las técnicas analizadas. Fuente: Elaboración propia, 2021.

Sistemas acuosos

El agua es uno de los disolventes más versátiles e inocuos hoy en día disponibles. Su estructura H-O-H de alta polaridad es apta para la disolución de materiales polares e iónicos, debido a su capacidad para formar puentes de hidrógeno con otras sustancias (Cremonesi & Signorini, 2016). Posee cualidades ionizantes y disociantes, además de presentar elevada tensión superficial y, consecuentemente, alta penetración, lo que puede suponer un riesgo si no se evalúa correctamente su uso al entrar en contacto con aglutinantes muy hidrolizados o sustancias aditivas e hidrosolubles propias de una película pictórica oleosa (Aguado-Guardiola et al., 2019). Con el fin de mejorar la acción del agua e incrementar el control sobre la intervención, se propusieron diferentes aditivos capaces de alterar las propiedades de la mezcla, como tensoactivos y quelantes, acompañados de la estabilización del pH y medios gelificantes (Wolbers, 2000; Cremonesi, 2014).

Descripción

Los *buffers* o soluciones tampón se producen al disolver, en ambiente acuoso, un ácido o una base débil con una de sus sales, generando una mezcla de pH específico y estable a la interacción con la superficie y el ambiente (Barros, 2005; Colomina et al., 2020). Las moléculas de ácidos y bases se ionizan y disocian en soluciones acuosas, liberando iones hidróxido e iones hidrógeno, modificando el medio de disolución (Barros, 2005; Cremonesi & Signorini, 2016). La medición de la concentración de los iones de hidrógeno presentes, permite conocer el rango de pH de la mezcla, considerando que un pH <7 indicará acidez, un pH=7 neutralidad y un pH >7 alcalinidad (Wolbers, 2000). Por ello, se recomienda el uso del agua en un rango de pH entre 6.5-8.5 sobre bienes policromados (VVAA, 2017), aunque ello varíe en otras tipologías de soporte alcalinas, como la pintura mural. De esta forma, se incrementa la seguridad y selectividad del método.

Los tensoactivos intervienen sobre el soluto en función de la Concentración Micelar Crítica (CMC). Una solución acuosa con valores inferiores a la CMC, mejorará la mojabilidad del medio, reduciendo la tensión superficial hídrica, sin formación de complejos micelares (Wolbers 2000). Cuando se alcanza la CMC en la disolución, se forman complejos micelares y permite agrupar sustancias inmiscibles entre sí, es decir, favorece la extracción de material hidrófobo a través de un medio hidrófilo (Colomina et al., 2020). Este proceso se verá también influenciado por el balance hidrófilo-lipófilo (HLB) que clasifica la solubilidad del jabón en el medio de aplicación (Cremonesi & Signorini, 2016), indicando su afinidad a disolventes de mayor o menor polaridad. Esto reflejará su empleo para la elaboración de geles, en combinación con ácido carboxílico, o emulsiones.

Los quelantes son agentes de limpieza capaces de extraer iones metálicos de la red de la retícula del soluto para atraparla en su estructura molecular (Cremonesi, 1999).

Aplicaciones

Las soluciones tampón facilitan la disolución de compuestos iónicos y sustancias hidrófilas como materiales proteicos y polisacáridos, permite su aplicación en sales, colas animales y gomas vegetales, respectivamente (Cremonesi, 2014). No obstante, con la adición de tensoactivos o quelantes, se incrementa el poder de disolución y efectividad en la limpieza de otras sustancias como aceites o resinas (Colomina et al., 2020).

La adición de tensoactivos a la solución acuosa, facilita la remoción de estratos cuya naturaleza sea lipófila, refiriéndose a lípidos, hidrocarburos o mezclas apolares (Wolbers, 2000). A su vez, en el empleo de sistemas mixtos más complejos, como geles o emulsiones, favorecerá la limpieza de superficies sensibles al agua como dorados, estucos o material pétreo de baja porosidad (UNE-EN 17138, 2019).

Los quelantes habitualmente se emplean para la limpieza de depósitos medioambientales, debido a la elevada presencia de iones metálicos como consecuencia de la contaminación atmosférica. No obstante, su efecto es capaz de remover estratos pictóricos como repintes o estucos, además de ciertas concreciones salinas (Colomina et al., 2020). Su uso se extiende tanto a materiales orgánicos como inorgánicos (Barros, 2005).

Sistemas acuosos

Ventajas

Se trata de un disolvente completamente inocuo para el restaurador y el medio, acarreado un coste energético mínimo para su producción industrial (Aguado et al., 2019). Su capacidad de disociación de moléculas le confiere unas cualidades excepcionales, pudiendo modificar el pH y la conductividad e incluir aditivos que permitan su aplicación sobre todo tipo de solutos, siendo extremadamente versátil y selectiva (Cremonesi, 2014).

La combinación de tensoactivos y quelantes en soluciones tamponadas permite una limpieza eficiente del estratificado pictórico, además de incrementar la efectividad del disolvente. Por un lado, se reduce la tensión superficial del agua, al igual que se le confieren propiedades detergentes (Barros, 2005). Por otra parte, los quelantes permiten la eliminación de sustancias habitualmente insolubles que hasta el momento habían recibido tratamientos agresivos e ineficaces, como las concreciones salinas (UNE-EN 17138, 2019).

Puede considerarse una herramienta alternativa a los disolventes orgánicos, reduciendo considerablemente el impacto medioambiental debido a la baja toxicidad del sistema (UNE-EN 17138, 2019).

Desventajas

Un uso inadecuado del agua puede producir la extracción de compuestos solubles de los estratos pictóricos, refiriéndose a films acrílicos u oleosos contemporáneos (Aguado et al., 2019); además de generar hinchamiento de los estratos de preparación tradicionales de cola animal y cargas inertes. En materiales que presenten elevada porosidad puede inducir la recristalización de sales contenidas en el sustrato (UNE-EN 17138, 2019).

La elección de un tensoactivo cuyo HLB sea seguro para la conservación de la materia pristina, comporta uno de los mayores riesgos sobre el uso de surfactantes. Una lectura incorrecta de dichos parámetros puede suponer la interacción con el material aglutinante de un film pictórico oleoso parcialmente polimerizado o medios grasos como ceras y otros lípidos (Cremonesi & Signorini, 2016), degradando la cohesión de la pintura a la vez que expone partículas de materia colorante a las inclemencias climáticas, reduciéndose considerablemente su estabilidad estructural.

La problemática que actualmente más preocupa a la comunidad de investigadores es el depósito residual. El uso de tensoactivos requiere posterior tratamiento de lavado y retirada de restos de material jabonoso, a fin de detener la acción limpiadora y evitar que las micelas interactúen con

compuestos originales de la pintura. Así pues, para asegurar la total retirada de residuos, se emplean elevadas cantidades de disolventes en formato libre aplicados con hisopo. Esta metodología puede poner en riesgo la conservación de la pintura, aun demostrándose que habitualmente siguen permaneciendo componentes no volátiles en la superficie (Khandekar, 2004). Todo ello depende del tipo de tensoactivo, la topografía del estrato y el buffer en el que se aplique.

No existe selectividad en la captación iónica del quelato. No obstante, es posible controlar la acción por medio de la corrección de pH del ambiente acuoso en el que se disperse (UNE-EN 17138, 2019). Su intervención sobre la estructura de aglutinantes grasos podría generar ruptura de enlaces y debilitar severamente el estrato pictórico (Barros, 2005). La aplicación de agentes quelantes sobre pigmentos cuya redícula contenga cationes metálicos, es susceptible de ser alterado por la acción del quelato. Esto incluye pigmentos insertos en preparaciones con sulfato cálcico, habituales en pintura de caballete. A su vez, el carbonato cálcico también puede ser alterado por el compuesto en soluciones acuosas de alta alcalinidad (Cremonesi & Signorini, 2016).

Medios disolventes

Disolventes orgánicos neutros

Descripción

Los disolventes orgánicos neutros pertenecen a la familia de disolventes cuya principal característica reside en la presencia de hidrógeno y carbono en su estructura química. Su intervención sobre el soluto se limita su a los enlaces intermoleculares, produciendo una separación física de la molécula sin alterar su estructura primaria (Colomina et al., 2020).

Dentro de este grupo encontramos hidrocarburos alifáticos y aromáticos, alcoholes, cetonas o ésteres; los cuales resumen la mayoría de solventes empleados en el ámbito de la restauración. Cada uno de estos tipos, responden a unos parámetros de solubilidad, cuyo conocimiento determina la afinidad con el soluto.

Aplicaciones

Los disolventes orgánicos neutros son capaces de disolver gran parte de materiales. Las combinaciones de hidrocarburos con cetonas y alcoholes, incrementa la versatilidad de estas sustancias para la remoción de materiales. Es habitual emplearlos para la eliminación de barnices, repintes o restos de cera y adhesivos. En función de las modificaciones que se realicen en la preparación de la mezcla, ya sea gelificándola o emulsionándola, puede aplicarse sobre obras sensibles a los propios disolventes, a través de la acción mixta de los medios acuosos.

Disolventes dipolares apróticos

Descripción

Entre los disolventes dipolares apróticos, encontramos los que presentan compuestos de azufre. Estos disolventes presentan elevada polaridad, siendo miscibles en medios acuosos y disolventes, exceptuando algunos disolventes apolares (Saera & Barros, 2008). Su elevado poder disociante, lo convirtió en el sustituto del dimetilformamida (DMF), considerando su uso para la limpieza de la mayoría de estratos (Signorini, 2010).

Los métodos de limpieza químicos suponen una rotura de los enlaces moleculares primarios, con la consecuente formación de enlaces intramoleculares con el soluto (Colomina et al., 2020; Cremonesi & Signorini, 2016). El empleo de disolventes dipolares apróticos, supone dicha ruptura de enlaces intramoleculares, produciendo la disociación total del soluto.

Aplicaciones

Su uso se extiende a la mayoría de estratos sensibles a los medios acuosos. El empleo de DMSO permite la disolución de repintes, aceites y barnices antiguos, muy polimerizados.

Ventajas

Son sustancias versátiles, cuyo uso está ampliamente estudiado y validado por la comunidad investigadora. Los riesgos derivados de la penetración se han controlado a partir del diseño de geles de disolventes, controlando el contacto de la obra con el disolvente. Existen diferentes medios y aplicaciones que permiten recurrir constantemente a este sistema, ya sea por la eliminación de materiales no deseados como para el aclarado del residuo depositado por el uso de geles.

Desventajas

Se trata de disolventes de moderada toxicidad y, por tanto, perjudiciales para la salud (Reina & Regidor, 2009). Su empleo supone la gestión posterior de residuos derivados del tratamiento, tales como hisopos, contenedores de los disolventes o material contaminado, siendo poco beneficioso para el medioambiente (UNE-EN 17138, 2019).

Su uso requiere aplicaciones controladas y evaluadas mediante testeo, ya que una selección incorrecta puede provocar el hinchamiento de las capas pictóricas oleosas (Phenix, 2010) y alterar la estructura polimérica de los films pictóricos.

Ventajas

Permite la disolución de sustancias poco reactivas a los medios acuosos o disolventes orgánicos neutros. Es efectivo en bajas concentraciones, proporciones que oscilan entre el 5-15%, debido al elevado poder disociante del solvente (Colomina et al., 2020).

Desventajas

Se trata de un disolvente de elevada penetración y alta retención, con amplios tiempos de permanencia en el polímero pictórico (Masschelein, 2004).

Es un disolvente cuya selectividad es muy limitada (Signorini, 2010). El efecto que produce en las capas pictóricas puede generar hinchamiento de estratos y ruptura indeseada de polímeros oleosos (Phenix, 2010a).

Técnicas mecánicas

Chorro de arena

Descripción

Se trata de un método de limpieza abrasiva cuyo mecanismo de limpieza supone el desgaste de la superficie del estrato, por medio del impacto de un árido (UNE-EN 17138, 2019).

Aplicaciones

Su uso se extiende a grandes superficies arquitectónicas, para la eliminación de manchas y depósitos estratificados de suciedad medioambiental, de elevado grosor. Habitualmente se utiliza sobre fachadas de edificios históricos que carezcan de elementos ornamentales de alto relieve.

No se recomienda su empleo para la remoción de sustancias superpuestas sobre restos de policromía. No obstante, puede emplearse puntualmente en zonas acotadas cuya limpieza pueda efectuarse de forma controlada (Reina & Regidor, 2009; UNE-EN 17138, 2019).

Ventajas

El chorro de arena es un método de limpieza accesible y de bajo coste (UNE-EN 17138, 2019). Mediante el ajuste adecuado de los parámetros del mecanismo, puede trabajarse de forma eficiente y eficaz, siendo aplicable a grandes superficies como fachadas, muros, pilares o columnas.

Desventajas

Desafortunadamente, se trata de un método agresivo, cuyo uso puede erosionar superficie del material a conservar. Esta degradación reduce la impermeabilidad de ciertos materiales, incrementando su fragilidad y reduciendo su resistencia a factores externos. La abrasión puede desencadenar la apertura de fisuras por donde accedan agentes de deterioro como el agua, proliferando material biológico como hongos o accedan insectos y animales.

A nivel estético también supone una pérdida de acabados y detalles decorativos, produciéndose una alteración de la pátina histórica del bien patrimonial. Ello conlleva intervenciones de reintegración y subsanación de daños que incrementan el coste de la intervención (UNE-EN 17138, 2019).

Por otra parte, los valores de concentración de partículas en el ambiente podrían superar los niveles de seguridad para el operador y liberarse en el entorno, contribuyendo a la contaminación del aire y espacios adyacentes. En consecuencia, requiere la posterior eliminación del residuo proyectado, ya que su deposición está acompañada de restos del depósito contaminado, incrementando el área de intervención (Reina & Regidor, 2009).

Ultrasonido

Descripción

Sistema de limpieza generador de ultrasonidos que propicia la remoción de estratos por medio de la vibración comprendida entre 25000 y 32000 Hz. La herramienta cuenta con un elemento de refrigeración por medio de nebulización de agua y aire comprimido, evitando el incremento de temperatura producido por la energía cinética (Jerez & Calero, 2020).

Aplicaciones

El empleo de esta herramienta es común sobre enclavados y concreciones de bajo espesor y elevada dureza (Jerez & Calero, 2020). Es decir, depósitos que no hayan penetrado en la matriz porosa del material conservable subyacente (Iglesias Campos, 2014; Zalbidea Muñoz et al., 2010).

Ventajas

Se trata de un sistema capaz de trabajar de forma precisa y eficaz, sin generar residuo secundario. Desprende el estrato con facilidad y control, actuando sobre pocos milímetros de superficie. A la vez que supone una alternativa sostenible al uso de disolventes.

Desventajas

La selección de la limpieza por ultrasonidos para la intervención sobre grandes superficies puede suponer una dilatación temporal. Por una parte, actúa en superficies reducidas y ello conlleva mayor tiempo de actuación, además de que requiere una limpieza posterior que retire aquellas partes donde la vibración pudiese provocar daños en la policromía.

Se trata de una técnica poco segura para su aplicación sobre pinturas descohesionadas (Jerez & Calero, 2020), tanto por requerir contacto directo con la superficie como por contar con una ligera proyección de aire comprimido y agua que podría desprender y/o solubilizar estratos originales.

Fotoablación

Láser

Descripción

La limpieza con radiación láser utiliza la energía fotónica y se produce por el impacto de un haz de luz coherente en espectro de longitudes de onda UV, visible e IR. La remoción del estrato sucede por la absorción de la radiación por el sustrato, produciéndose la eliminación a través de un proceso denominado ablación (VVAA, 2013). En el tratamiento se pueden dar lugar procesos fototérmicos, fotomecánicos y fotoquímicos, (UNE-EN 17138, 2019) en función del soluto y las fuerzas de unión con el material subyacente.

Su optimización en los últimos 30 años ha favorecido la limpieza progresiva, selectiva y precisa del láser (Pouli et al., 2012; Salimbeni, 2006). Esto ha incrementado la versatilidad del método, aplicable a capas inorgánicas y algunas orgánicas, limitándose a la remoción superficial de pocas micras de espesor, en contraposición a los riesgos que implica la penetración de algunos disolventes (Salimbeni, 2006).

Aplicaciones

La radiación láser permite la remoción de estratificaciones cuyo coeficiente de absorción se encuentre claramente diferenciado (UNE-EN 17138, 2019). Es por ello que su uso se extiende a materiales orgánicos como líquenes (Pouli et al., 2012), textiles, madera, pergamino, cuero y papel, aunque su aplicación sobre inorgánicos esté más extendida, comprendiendo metales, yeso, cerámica y soporte pétreo (Cotec, 2010; Salimbeni, 2006).

Ventajas

Se trata de un sistema de limpieza que supone una alternativa revolucionaria que resuelve diferentes problemáticas asociadas a la penetración, retención, eliminación de residuos o escaso control sobre el proceso de remoción, tratándose de una limpieza inocua para el operador, sin residuo secundario, eficiente y selectiva (Cotec, 2010; Pouli et al., 2012).

La selectividad del método se consigue a través de la modificación de las diferentes longitudes de onda que irradian la superficie, por lo que la reproductibilidad de los parámetros facilita el análisis de resultados y estudio de mejoras en el proceso de limpieza (UNE-EN 17138, 2019).

Por otro lado, permite trabajar con seguridad sobre estratos no cohesionados o frágiles, al no requerir contacto directo con la superficie, a diferencia de los métodos mecánicos (UNE-EN 17138, 2019; VVAA, 2015).

Desventajas

El uso incorrecto de los parámetros del haz de radiación láser puede provocar severos daños sobre la estructura del bien cultural. Aunque algunos materiales cuenten con grandes investigaciones que proponen parámetros de limpieza seguros, deben reevaluarse in situ, con el fin de minimizar las variables que podrían afectar al correcto funcionamiento de la máquina. Es por lo que se requieren altos niveles de conocimiento sobre la técnica, además de contar con analíticas que identifiquen con exactitud la naturaleza del soluto (UNE-EN 17138, 2019).

A menudo se producen modificaciones en el cromatismo de ciertos materiales tras la acción del láser, producidas por la selectividad en la remoción de estratos o alteraciones físico-químicas producidas por el método. Es común observarlas en algunos pigmentos, mármoles, alabastros o ciertas pátinas férricas (VVAA, 2013).

Métodos biológicos

Biolimpieza

Descripción

Sistema de limpieza efectuado por microorganismos no patógenos cuya intervención en el medio natural se reaprovecha para la remoción de sustancias no deseables. La selección del microorganismo implica un estudio completo de la naturaleza del estrato a eliminar, con la intención de reproducir las condiciones idóneas para que la bacteria o la enzima lleve a cabo los procesos catalíticos propios de su naturaleza (UNE-EN 17138, 2019).

Las condiciones de supervivencia de los organismos vivos son controlados, supervisados y evaluados por un operador, lo que implica un ajuste adecuado de los métodos de aplicación, vinculados tanto a la clase de microorganismo como a las condiciones de trabajo en las que se va a producir el tratamiento, como la extensión, la disposición del soporte y su morfología o el presupuesto (Bosch-Roig, Lustrato, et al., 2014; UNE-EN 17138, 2019). Por otro lado, estos organismos vivos requieren recursos como energía, macronutrientes, agua y otros elementos (Bosch-Roig, Lustrato, et al., 2014).

La adquisición de los microorganismos puede producirse mediante cultivos microbianos o adquirirse de forma comercial de colecciones internacionales (Bosch-Roig, Ranalli, et al., 2014; UNE-EN 17138, 2019).

Las enzimas más empleadas para la conservación de bienes culturales son las proteasas, las amilasas y las lipasas. Cada una de ellas interviene en la descomposición específica de estructuras moleculares orgánicas (Barros, 2005). En el caso de las bacterias, las más comunes son *Desulfovibrio desulfuricans*, *Desulfovibrio vulgaris*, *Pseudomonas stutzeri*, *Pseudomonas korensis*, *Stenotrofomonas maltophilia* y *Cellulosimicrobium cellulans* (UNE-EN 17138, 2019).

Aplicaciones

Es posible su uso sobre depósitos orgánicos e inorgánicos, tales como adhesivos sintéticos, costras, sales, colas animales, materiales cerosos o contaminantes medioambientales. Todo ello aplicado sobre edificios históricos, esculturas, pinturas al fresco o de caballete, cerámica o papel, resumiendo la mayoría de matrices empleadas en patrimonio cultural (Bosch-Roig, Lustrato, et al., 2014; Sanmartín et al., 2014).

Su aplicación sobre la superficie puede producirse por inmersión o a través de sustentantes como sepiolita, lana de algodón, carbogel, morteros, perlas de alginato, agar-agar o arbocel, cuya selección se verá influenciada por el tipo de obra y otros aspectos vinculados a la intervención, tanto logísticos como por la naturaleza del microorganismo (Bosch-Roig, Lustrato, et al., 2014).

Las aplicaciones de las enzimas también se caracterizan por el tipo de organismo, el uso de las proteasas produce la hidrólisis de proteínas, encontrándose contenidas en colas y gelatinas, albúmina, caseína y huevo. Las amilasas protagonizan la degradación de hidratos de carbono, presentes en materiales como el almidón, harinas o gomas vegetales. Mientras que las lipasas descomponen materiales oleosos y grasos, actuando sobre los triglicéridos de los mismos (Barros, 2005).

A su vez, la aplicación combinada de bacterias y enzimas incrementa la efectividad y eficiencia del método, como en estratos de cola animal aglutinados con aceites y proteínas, combinando Lipasas, Proteasas y *Pseudomonas stutzeri* (Palla et al., 2016).

Ventajas

La biolimpieza supone una alternativa al uso de disolventes o medios de limpieza mecánicos, debido a su inocuidad, selectividad y eficacia demostrada en estratos que hasta el momento se habían sometido a intervenciones más agresivas (Bosch-Roig, Ranalli, et al., 2014). Su acción hidrolítica selectiva, concede una cualidad naturalmente única al sistema, capaz de actuar sobre estructuras moleculares concretas sin alterar los materiales circundantes (Barros, 2005).

Con el paso de los años, se han reducido los costes de este tipo de limpieza, optimizando su uso sobre estratos orgánicos, sumado a la incorporación de nuevas aplicaciones y usos sobre polímeros sintéticos (Sanmartín et al., 2014).

Desventajas

La investigación en biolimpieza está enfocándose en la resolución de los aspectos que limitan su uso a la comunidad de restauradores. Entre ellos se identifican largos procesos de limpieza debido a la repetición de aplicaciones cuando el estrato presenta elevado espesor, habitualmente acompañado de tratamientos previos para reducir variables que puedan entorpecer la acción metabólica de los microorganismos. También influye en la temporalización la selección del sistema y su método de aplicación, ya que requiere profundos estudios con los que asegurar la compatibilidad con el estrato a remover. Esto conlleva elevados niveles de selectividad, lo cual implica el desarrollo específico de estrategias para cada uno de los materiales (UNE-EN 17138, 2019).

Evidentemente, se trata de una limpieza que requiere altos conocimientos en biología y química de los materiales, sumado a la necesidad de contar con material de laboratorio y equipo adecuado para controlar la acción de los microorganismos.

En el caso de las enzimas, también requieren ambientes de aplicación extremadamente controlados. El pH, la temperatura y la inclusión de agentes micelares deben controlarse para que la supervivencia del compuesto hidrolítico. Su contacto con ciertos pigmentos cuya composición contenga iones metálicos pesados, tales como plomo, cobre o mercurio, inhibe la reacción enzimática y bloquea el tratamiento (Barros, 2005).

5.2 COMPARACIÓN MÉTODOS DE LIMPIEZA

Incidiendo en la definición del término, la limpieza consiste en la eliminación de cualquier sustancia extraña a la naturaleza del bien patrimonial, cuya interacción puede ser perjudicial para su conservación. Esa nocividad puede estar ligada a factores estéticos, de reconocimiento del bien; o químicos, para detener ciertas acciones degradativas (Barros, 2015; Pérez et al., 2019). Es un tratamiento que requiere un análisis interdisciplinar que establezca prioridades y consenso entre las diferentes esferas que configuran la integridad y autenticidad del objeto cultural (Laudenbacher, 2010). A la hora de determinar un protocolo e involucrar la técnica de limpieza más afín, es necesario normalizar la incorporación de criterios referentes a la sostenibilidad del tratamiento (Balliana et al., 2016)

Las técnicas anteriormente descritas, presentan aplicaciones sobre superficies patrimoniales muy diferentes. Por un lado, se describen los medios acuosos, los cuales son aplicables a todos aquellos estratos cuya interacción con el agua y sus aditivos, sea segura y controlada. Con ello se refiere a la mayoría de especializaciones patrimoniales (Pérez et al., 2020), como pintura de caballete, pintura mural, escultura, arquitectura, arqueología, obra gráfica, archivos y documentos... Mientras que otras técnicas, como el chorro de arena, tienen aplicaciones más acotadas, como pintura mural, arquitectura o arqueología (UNE-EN 17138, 2019). Por lo tanto, intervienen ciertos aspectos que favorecen la versatilidad de un método sobre otro y amplían su validez a más categorías de objetos. Existe una diferencia fundamental entre las dos técnicas mencionadas, referida a la intervención que tienen sobre el soluto. Los medios acuosos pueden producir una ruptura de enlaces intermoleculares o intramoleculares, en función de los aditivos contenidos en la solución acuosa (Cremonesi, 2014), frente a la separación de partículas unidas débilmente por fuerzas de Van der Waals provocada por el impacto de material inerte (UNE-EN 17138, 2019). Ambos sistemas han sido ampliamente utilizados en tratamientos de restauración. No obstante, conllevan riesgos específicos que respetan en mayor o menor medida la inocuidad de la intervención sobre la obra.

El control y la selectividad, el residuo secundario y la toxicidad, son aspectos comunes a las técnicas de limpieza que deben ineludiblemente atenderse a la hora de establecer un protocolo de limpieza crítico y razonado. La inocuidad en los procedimientos de restauración consiste en la extracción selectiva de todos o parte de los materiales presentes en la estructura superficial, (...) consistiría en no involucrar a los demás materiales y, de forma muy especial, a los que componen la estructura pictórica (Barros, 2001). Por lo tanto, se concibe como un tratamiento de selección y remoción de una sustancia sin alterar las colindantes (Pérez et al., 2019).

Antiguamente se empleaban métodos muy agresivos, cuyo control sobre la interacción con el soluto era limitada. Los valores de penetración, retención, volatilidad y toxicidad quedaban en segundo plano, comprometiendo la seguridad en las limpie-

zas. La incorporación de disolventes orgánicos y jabones permitieron regular la agresividad de las limpiezas. No obstante, la toxicidad de los solventes produce un impacto medioambiental que obliga a plantear la inclusión de sistemas eco-compatibles e inoocuos para el operador (Bosch et al., 2014; Pérez et al., 2020). A medida que la ciencia para la restauración avanzó hacia métodos más críticos y selectivos, se minimizaron los riesgos que conllevaban algunos de esos parámetros. No obstante, el residuo no volátil depositado por productos de limpieza más seguros, sigue siendo una línea de investigación que parece encontrar soluciones en la nanociencia (Pérez et al., 2018) y otros métodos en los que intervienen compuestos completamente volátiles.

Se considerará residuo toda sustancia sólida o líquida que quede retenida en la estructura del soporte tras ser intervenido (Pérez et al., 2019). Este depósito, puede interferir con el material original y desencadenar procesos de degradación. La interacción con el bien puede ser imprevisible, sobretodo en materiales contemporáneos, por el empleo de estructuras poliméricas complejas y la extracción de aditivos solubles (Ormsby et al., 2013).

Evaluando los sistemas de limpieza más habituales en función del residuo, inocuidad y eficiencia (Tabla 2.), puede identificarse el láser y la limpieza por ultrasonidos como las únicas técnicas que no generan residuos secundarios, al ser procesos que no requieren material adicional para su aplicación ni tratamientos para la eliminación de compuestos atrapados en superficie. No obstante, junto al chorro de arena son los más abrasivos y, por ello, requieren una evaluación constante de resultados e interacción con el material sustentante (UNE-EN 17138, 2019).

A diferencia de los sistemas de limpieza en seco, los medios húmedos (Zalbidea et al., 2010) involucran el parámetro de la penetración y toxicidad. La penetración supone un riesgo para las intervenciones sobre estructuras porosas, al difundirse mayor cantidad de soluto en su estructura (Pérez et al., 2018). No obstante, los avances en el empleo de geles y materiales espesantes, permite retener la acción disolvente, controlar la penetración e incrementar la selectividad y control del tratamiento (Colomina et al., 2020). En cuanto a la toxicidad, la incorporación de los medios acuosos y la innovación en biolimpieza, han supuesto una alternativa eco-sostenible a los disolventes tradicionales (Bosch et al., 2014). La senda en la investigación de sistemas respetuosos con el medioambiente, pretende reducir el uso de disolventes a intervenciones puntuales (Pérez et al., 2018), tratando de abarcar las diferentes problemáticas que habitualmente llevan a su uso, como la eliminación de repintes, barnices y adhesivos (Pérez et al., 2019).

Tabla 2. Estudio comparativo de métodos de limpieza.

Método	Residuos Secundarios	Conductor de electricidad	Abrasivo	Tóxico	Tiempo de contacto	Penetración	Control	Velocidad limpieza	
Sistemas acuosos	Sí	Sí	No	No	Bajo	Baja	Elevado	Media	
Medios disolventes	Disolventes orgánicos neutros	Sí	No	No	Sí	Moderado	Moderada*	Elevado	Media
	Disolventes dipolares apróticos	Sí	No	No	Sí	Moderado	Elevada	Moderado	Media
Técnicas mecánicas	Chorro de arena	Sí	No	Sí	Sí	Moderado	No procede	Moderado	Alta
	Ultrasonido	No	No	Sí	No	Bajo	No procede	Elevado	Alta
	Chorro hielo seco	No	No	No	No	Bajo	No procede	Elevado	Alta
Fotoablación	Láser	No	No	Sí	No	Bajo	No procede	Elevado	Alta
Métodos biológicos	Biolimpieza	Sí	Sí	No	No	Elevado	Bajo	Elevado	Baja

Fuente: Elaboración propia (2021)..

*La penetración varía en función de los diferentes grupos de disolventes (Barros, 2005).

6

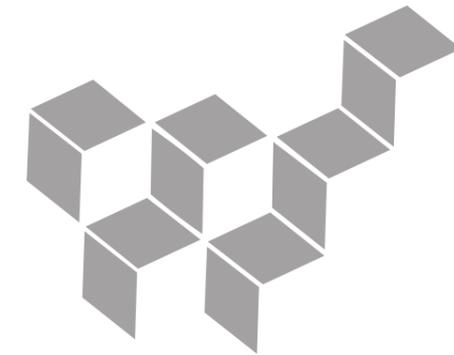
Análisis de la
limpieza criogénica

La propuesta de inclusión del chorro de hielo seco en la restauración del patrimonio ofrece una alternativa innovadora, respetuosa con la obra, sostenible y eficiente al uso de métodos abrasivos, tóxicos o que requieran tiempos de tratamiento dilatados y poco viables para los requerimientos de la intervención. Su mayor campo de aplicación se encuentra en otros sectores, siendo una técnica ampliamente utilizada y segura, por lo que la aproximación relativa a los usos y resultados que pueden obtenerse, se halla estrechamente ligada a los estudios desarrollados para dichas aplicaciones y fines (Kohli & Mittal, 2019; Y.-H. Liu et al., 2011; Spur et al., 1999).

La fabricación de hielo seco es sencilla y accesible. Su bajo coste la convierte en una técnica inclusiva que no requiere de grandes recursos para su aplicación. Las características materiales de los pellets de CO₂ le confieren la capacidad de sublimar tras impactar sobre la superficie, liberándose en formato gaseoso a la atmósfera, sin dejar residuo a su paso (Spur et al., 1999).

La combinación de hielo seco, electricidad y aire comprimido, formula un sistema de limpieza económico, no abrasivo y respetuoso con el medioambiente que reemplaza el uso de productos químicos, materiales abrasivos, altas temperaturas o vapor de agua. Este sistema de limpieza, conserva la cadena de producción y uso sostenible, al tratarse de la proyección compactada de subproductos derivados de procesos industriales, pudiendo también ser naturales. Esta técnica se emplea para la remoción de estratos pictóricos, como esmaltes, polímeros acrílicos, acrílicos o la remoción de particulado contaminante depositado. A su vez, la industria médica, farmacéutica y alimentaria cuentan con la proyección de CO₂ sólido para la esterilización ambiental y de superficies, mientras que, en la producción de la metalurgia y polímeros, como plástico o caucho, su uso protagoniza el desbarbado de componentes (Kohli & Mittal, 2019) y limpieza de moldes.

Para una mejor comprensión sobre el uso y aplicación del chorro de hielo seco, se propone un análisis agrupado en tres bloques que contemplan el proceso, la selección del equipo y la adaptación de los parámetros y componentes de la máquina. El estudio de casos permite ejemplificar el estudio técnico del sistema e ilustrar la adaptabilidad y efectividad del método tanto en el sector industrial como en el ámbito patrimonial.



6.1 FUNCIONAMIENTO DE LA LIMPIEZA CRIOGÉNICA

La limpieza criogénica consiste en la proyección con aire comprimido de CO₂ sólido. El hielo seco se produce a partir de la solidificación de dióxido de carbono, sometiéndolo a una temperatura de -79°C (Dominguez et al., 2011).

Los pelleteizadores trabajan la extrusión y fragmentación del bloque de CO₂ para la producción de pequeños cilindros de diámetro y largo variable, aunque el diámetro estándar es de 3 mm como material proyectable para dry ice blasting (Fig. 5). En el caso del snow blasting, la máquina de criolimpieza obtiene una bruma amorfa de partículas aglomeradas a partir de dióxido de carbono líquido sometido a temperaturas inferiores a -70°C (Y. H. Liu et al., 2011) y -18°C en estado líquido (Jassim & Khalaf, 2020).

La remoción de estratos se consigue a través de un efecto termomecánico combinado. El método aplica simultáneamente el efecto térmico inducido por la temperatura del proyectil, junto a la energía cinética con la que las partículas son propulsadas y la energía de sublimación promovida por el cambio de fase del dióxido de carbono solidificado (Spur et al., 1999). En ningún caso interviene el propio aire comprimido como agente de limpieza, su participación resulta ser un medio para la proyección del pellet (Sherman, 2007). La limpieza es efectiva sobre estratos unidos físicamente, por medio de fuerzas de Van de Waals, unión electrostática o fuerzas capilares. En ningún caso podrá aplicarse para la remoción de un estrato unido químicamente a la matriz (Smithsonian American Art Museum, 2015).

La principal ventaja del método es la sublimación del sólido proyectado, pasando del estado sólido al estado gaseoso debido al cambio de presión atmosférica (Y. Liu & Matsusaka, 2013; Sherman, 2007). Esto permite la reducción total de residuo secundario, en paralelo al remanente del estrato eliminado (Dominguez et al., 2011).

Fig. 5 Sistema de elaboración de los pellets de hielo seco. Fuente: Cold Jet, 2021.



Efecto térmico

Los valores de temperatura de los pellets son de aproximadamente -70°C en el momento de su almacenamiento en el tanque de la máquina. No obstante, estos no se mantienen termoestables durante el proceso de limpieza, incrementándose ligera y gradualmente la temperatura al introducirse en el circuito mecánico, pasando por la manguera que finalmente los derivará a la boquilla de proyección. Una vez proyectado, la temperatura superficial del material sobre el que impacta es de -12°C (Spur et al., 1999). No obstante, en el uso de snow ice partir de mediciones tomadas por imagen térmica a través de FLIR 320EX, se ha demostrado que la temperatura mínima del chorro al impactar contra el estrato es de $8,1^{\circ}\text{C}$ (Shockey, 2009).

El impacto del hielo seco sobre el material produce una disminución regional de la temperatura superficial. El subenfriamiento pasa a desencadenar procesos alteradores de las propiedades mecánicas del sustrato, disminuyendo su elasticidad y aumentando consecuentemente su friabilidad. A su vez, se produce un encogimiento del material, manifestado macroscópicamente en una red generalizada de agrietamientos, que evidencia los distintos coeficientes de expansión térmica entre capas y la desencadenante merma de energía adhesiva entre las mismas, provocando su desprendimiento (Spur et al., 1999) (Fig. 6).

Energía cinética

Algunos autores indican que el 30-40% de la eficiencia de la limpieza criogénica corresponde al efecto de la energía cinética, mientras que el 60-70% restante se debe a la temperatura (Piening & Schwarz, 1998; Spur et al., 1999), otros afirman que se trata del principal responsable del proceso de remoción (Van der Molen et al., 2010). A su vez, se considera que la eficacia del sistema es directamente proporcional a la presión del chorro (Y.-H. Liu et al., 2011), la potencia de la máquina y, en consecuencia, la fuerza con la que impactan los pellets sobre el sustrato (Piening & Schwarz, 1998). No obstante, el tipo de boquilla, el tamaño del pellet o las dimensiones de la manguera también podrían influir, además del ángulo desde el que se proyecte el chorro. El aumento de efectividad corresponderá a ángulos menores de inclinación de la pistola (Van der Molen et al., 2010).

Energía de sublimación

La sublimación colabora ineludiblemente en el proceso de limpieza. Las fuerzas de unión entre el material a remover y la matriz sustentante se ven gravemente afectadas por el efecto térmico y cinético, rompiéndose por completo tras la expansión que se produce en el proceso de sublimación del sólido (Fig. 7). El gas actúa entre los intersticios del estratificado, incrementando la presión entre capas hasta desprenderlas (Spur et al., 1999).



Fig. 6 Intervención del hielo seco sobre el estrato indeseado. Fuente: Elaboración propia, 2021.

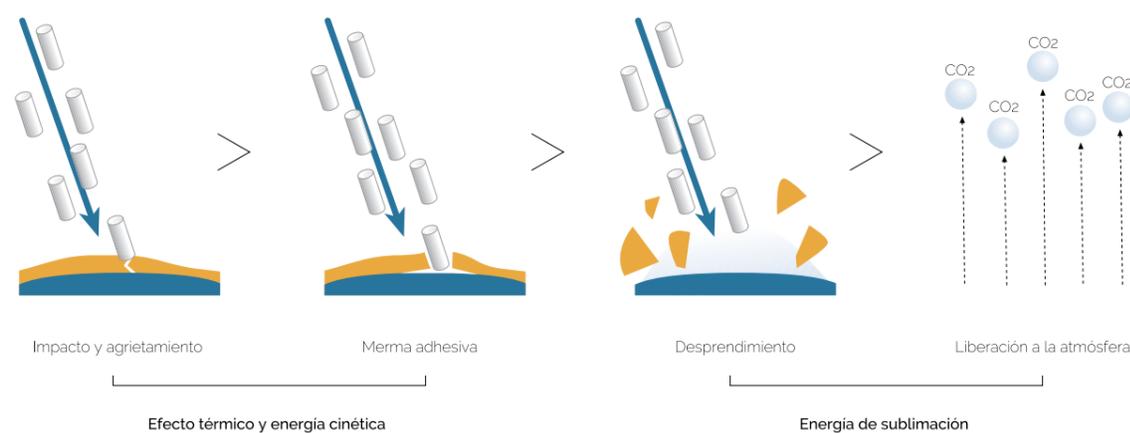


Fig. 7 Intervención del hielo seco sobre el estrato indeseado. Proceso de sublimación. Fuente: Elaboración propia, 2021.

6.2 REVISIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS DISPONIBLES EN ELMERCADO.

Actualmente encontramos numerosas empresas dedicadas a la prestación de servicios para la limpieza criogénica de plantas industriales, ligado a la remoción de grandes acumulaciones de sustratos adheridos a maquinaria o zonas de trabajo con intersticios poco accesibles, descartando el desmontaje del equipo, donde la problemática reside en la paralización de la producción y la gestión de los subproductos derivados de la misma. Un ejemplo de ello son las plantas de procesamiento de alimentos, cuyo rigor en la salubridad de las instalaciones, sumado a alcanzar la media de producción diaria, encuentra contraindicaciones en la higienización por medios disolventes, dilatando la paralización de la cadena de trabajo, además de los tiempos de evaporación que se deriven de la retención del solvente. La industria tecnológica se suma al uso de este sistema, debido a la inocuidad sobre componentes electrónicos y la minuciosidad alcanzable mediante acoples y corrección de parámetros. Por otro lado, espacios públicos con problemática asociada a grandes acumulaciones de contaminación medioambiental, intervenciones vandálicas con aerosoles sobre fachadas de edificios o zonas de interés político y ciudadano, como monumentos o templos de culto.

El diseño actual de la mayoría de los equipos disponibles en el mercado se fundamenta en lograr la limpieza de amplias zonas de sustrato regular e irregular, en cortos plazos de tiempo y máxima sostenibilidad, tanto por la seguridad de los trabajadores, como para comprometer mínimamente la producción ante los residuos y subproductos que de ésta se derivan. La atención al residuo no volátil depositado en superficie, dejará de ser un problema, sin segundo tratamiento de lavado y retirada de material; como ocurre, por ejemplo, con la limpieza microabrasiva con chorro de arena.

Entre las empresas localizadas a nivel nacional e internacional, encontramos una parte dirigida a la oferta de servicios de limpieza criogénica, donde se establece un mercado enfocado al alquiler del equipo, la compra de CO₂ en estado líquido o sólido y, ocasionalmente, la presencia de un operador responsable del empleo de la máquina. A su vez, éstas y otras empresas, complementan u ofertan únicamente la venta de equipos, además de hielo seco, siendo las pioneras en el diseño innovador de dispositivos de limpieza criogénica (Tabla 3). Entre estas últimas, únicamente encontramos a nivel nacional enICEco® & INTELblast®, siendo más común la investigación y producción de nuevos sistemas en países como Dinamarca, Bélgica o Alemania, como es el caso de PolarTech®, ColdJet® o Kärcher®. Todas ellas son grandes empresas con recursos para el diseño y distribución de los productos, contando algunas de éstas con filiales en España, lo que mejora la viabilidad y accesibilidad a nuevos dispositivos con importantes mejoras en la eficiencia.

Respecto a las competencias que intervienen en la eficacia de la limpieza, se refiere el control de las variables de presión y volumen de material o reducción de ta-

maño del pellet proyectado. A su vez, el desarrollo del sistema de limpieza *snow blasting cleaning* (SBC), donde se sustituye el pellet sólido por CO₂ líquido, contribuye a un aumento de precisión y rigor. El acceso a equipos SBC, lo encontramos a través de la empresa PolarTech®, quien cuenta con una máquina híbrida que incluye *dry ice blasting* (DIB) y *snow blasting* (SBC); a la vez que otra diseñada únicamente para SBC. En paralelo, empresas como Cryoclean® y Cryosnow®, en Reino Unido y Alemania respectivamente, también desarrollan y distribuyen equipos SBC de similares características.

6.2.1 EQUIPOS DISPONIBLES. *Dry ice blasting* y *snow blasting*.

La disponibilidad de máquinas diseñadas para limpieza criogénica es amplia y accesible. Grandes empresas multinacionales como Kärcher®, proveedoras de equipos para limpieza industrial y doméstica, han introducido el chorro de hielo seco entre sus productos. Su uso resulta una alternativa sostenible y eficaz para la eliminación de estratos de suciedad medioambiental en fábricas o en zonas expuestas a la contaminación atmosférica. Por lo tanto, la mayoría de equipos se encuentran dirigidos a naves de producción seriada, donde existen grandes superficies cubiertas de concreciones hidrocarbonadas, acumulaciones de particulado o recubrimientos poliméricos indeseados (Fig. 8).

Los equipos han evolucionado con la inclusión de nuevas aplicaciones para esta tipología de limpieza. Las máquinas más rudimentarias, donde el tamaño del pellet o la presión del chorro eran mínimamente ajustables y la precisión podía obtenerse por medio de distintas tipologías de boquilla, comparten mercado con nuevos dispositivos, generándose una diferenciación entre aparatos *dry ice blasting* y *snow blasting*. El primero trabaja a través del impacto de pequeños cilindros o pellets de CO₂, habitualmente de 3 mm de diámetro. La presión del chorro y la cantidad de pellets es regulable, en paralelo a la tipología de pistola acoplada y la distancia desde la que se proyecta (Fig. 9). A diferencia de los equipos de *dry ice blasting cleaning*, el mecanismo de *snow blasting cleaning* trabaja desde la proyección de hielo seco almacenado en botellas de CO₂ en estado líquido, convirtiéndolo en una nube granulada a -78,5°C, la cual sublima al impactar contra la superficie del estrato a remover. Dicha nube, sirve de materia original para la producción de los cilindros de hielo, cuya presentación se debe a la compactación de la primera solidificación del CO₂. Según el fabricante, el empleo de la fase líquida de dióxido de carbono, facilita la adaptabilidad del método a los requerimientos de la superficie, a la vez que reduce el consumo de materia prima y su peso, mejorando su manejabilidad.



Fig. 8 Intervención del hielo sobre seco recubrimientos poliméricos. Fuente: Cold Jet, 2021.

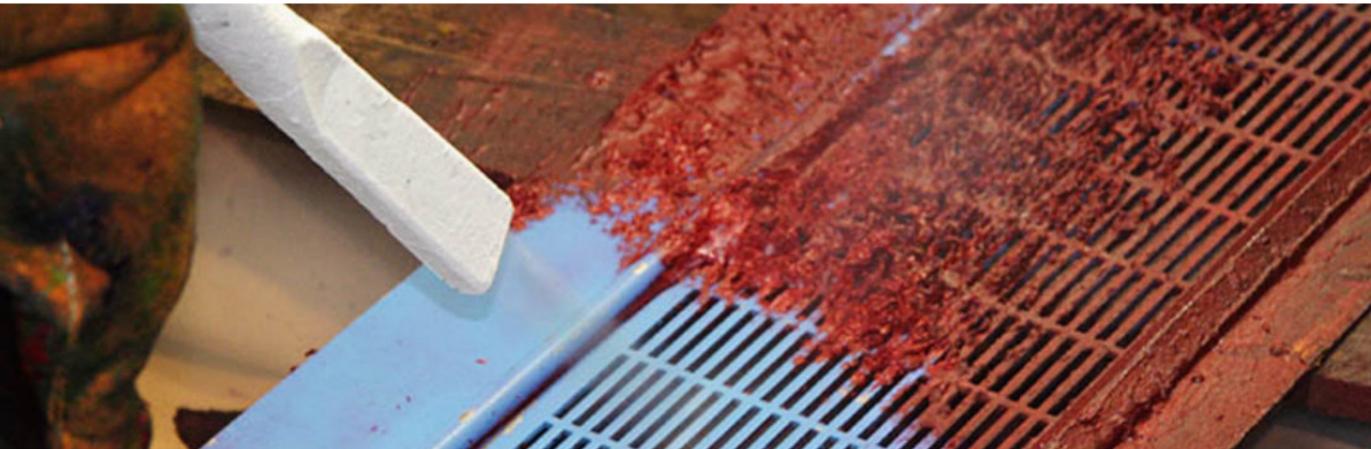


Fig. 9 Resultados del *dry ice blasting*. Fuente: Cold Jet, 2021.

Dry Ice Blasting

El diseño de los equipos dirigidos a la limpieza criogénica con CO₂ en estado sólido, se presenta como una torre móvil, conferida de ejes rotatorios para su desplazamiento y estribos de empuje. Esencialmente, está configurada por un contenedor para pellets, dotado de aislamiento para su correcta conservación, manguera sobre la que se acopla la pistola o válvula de proyección y un cable de alimentación, junto con toma a tierra. El dispositivo está dotado de un panel de control, permitiendo la variación de los valores de presión del chorro de aire comprimido, la dosificación del hielo proyectado y la activación/desactivación del equipo, también para su desconexión en caso de emergencia (Fig. 10 y 11). Algunos equipos constan de válvula de vaciado de depósito, lo que facilita la sustitución y retirada del material de proyección.

Las características de los equipos *dry ice blasting* encontrados en el mercado muestra prestaciones técnicas comunes, a pesar de estar dotados con diferencias para su manipulación y uso que pueden ser determinantes a la hora de analizar su idoneidad ante ciertas tipologías de tratamiento. Los equipos comparados en este estudio pertenecen a las empresas Kärcher®, PolarTech®, ColdJet®, Aquila Triventek® e INTELblast® (Tabla 3), reflejados a través de los datos facilitados por el fabricante en la ficha técnica y ficha de seguridad de los diferentes equipos o el contacto directo con empresas que los suministran y emplean en los servicios de criolimpieza.

El cómputo de equipos seleccionados, presenta grandes dimensiones (1000×800×1300mm o 990×480×1140 mm) estrechamente vinculadas a la capacidad del tanque para almacenaje de pellets (40-25 kg). Todo ello configura máquinas de gramaje medio (60-100 kg), por lo que diversas empresas han apostado por el diseño de pequeños sistemas, donde se reducen a la mitad tanto las dimensiones, como la capacidad del tanque y, por consiguiente, el peso total. A su vez, cada uno de estos valores se encuentra relacionado con el caudal volumétrico del aire y el consumo de material, siendo directamente proporcionales.



Fig. 10 Equipo BL 60. Producto de la empresa AQUILA Triventek®. Fuente: AQUILA Triventek, s.f.



Fig. 11 Equipo PCS 60-AERO2®. Producto desarrollado por AERO2® y la empresa Cold Jet®. Fuente: Cold Jet, 2019.

Tabla 3. Equipos y características para proyección de hielo seco.

Empresa	Equipo	Dimensiones	Fuente alimentación	Conexión de aire comprimido	Presión del aire	Caudal volumétrico del aire	Nivel de presión acústica	Capacidad del tanque	Pellets ø	Consumo	Peso sin accesorios
Kärcher®	IB 15/20	1000 × 800 × 1300 mm	0,6 kW	Acoplamiento de garras*	2-16 bar	2-12 m ³ /min	125 dB/A	40 kg	○ <3 mm	30-120 kg/h	91 kg
	IB 7/40 Adv	768 × 510 × 1096 mm	220V-240V / AC 50 Hz	Acoplamiento de garras	2-10 bar	0,5-3,5 m ³ /min	99 dB/A	15 kg	○ <3 mm	15-50 kg/h	93 kg
PolarTech®	PT 25	970 × 520 × 670 mm	110V-230V / AC 50 - 60 Hz	-	2-10 bar	1-5 m ³ /min	60-120 dB/A	25 kg	○ -	0-+50 kg/h	60 kg
	PT MINI	400 × 409 × 476 mm	110V / 230V AC 50/60 Hz	-	2-10 bar	0,6-3 m ³ /min	60-120 dB/A	8 kg	○ -	25 kg/h	26 kg
Cold Jet®	AERO ₂ PCS® 60	990 × 480 × 1140 mm	110V / 220V AC 50/60 Hz	Boquillas Straight Through de 3/4"	2,8-10 bar	0,3-2,8 m ³ /min	Bajo ISFI	27 kg	◇ 3-0,3 mm	<108 kg/h	114 kg
	AERO ₂ PLT® 60	990 × 480 × 1140 mm	110V / 230V AC 50/60 Hz	Boquillas Straight Through de 1"	2,4-17,2 bar	1,4-4,7 m ³ /min	Bajo ISFI	27 kg	◇ 3-0,3 mm	0-162 kg/h	105,69 kg
AQUILA Triventek®	BL 60	700 × 530 × 1100 mm	110V / 220V AC 50/60 Hz	Acoplamiento de garras	2-14 bar	2-12 m ³ /min	-	23 kg	○ 3-1,7 mm	30-80 kg/h	88 kg
INTELblast®	IBL 3000	780 × 400 × 1110 mm	-	-	2-16 bar	-	-	25 kg	<3 mm	25-90 kg/h	80 kg
	IBL 4000	780 × 540 × 1110 mm	110V / 220V	-	2-16 bar	-	-	25 kg	<3 mm	25-90 kg/h	93 kg
	IBL Mini	550 × 480 × 610 mm	-	-	2-12 bar	0,3-5 m ³ /min	75 dB/A	8 kg	<3 mm	10-30 kg/h	29 kg
Cryoblaster®	ATX25-E	410 × 400 × 1110 mm	-	-	3-15 bar	-	-	15 kg	○ -	0-65 kg/h	67 kg

Nota. Tabla de autoría propia en base a las Fichas de Producto de las empresas.

* Siguiendo la normativa de seguridad DIN 3238 para el acople de garras en manueras de aire comprimido.

Snow Blasting

Para la proyección de dióxido de carbono en estado líquido, la mayoría de dispositivos diseñados están compuestos por un módulo de pequeñas dimensiones desde el que se controla la presión de aire y la entrada de CO₂ en la manguera de impacto. Acompañado de ello, se acopla la bombona de líquido, cuya capacidad resulta variable, al igual que la de los tanques de conservación de gránulos de hielo (Fig. 12). En ocasiones, el equipo presenta sistemas de rodamiento para facilitar su traslado (Fig.13) o habilitación para el acople de la botella, compactando el cómputo del sistema (Fig. 14).

Entre los equipos considerados (Tabla 4), destaca el modelo PT Combi, de la empresa PolarTech®, cuya peculiaridad reside en la hibridación del sistema DIB y SB. Se presenta como un dispositivo único, donde se introduce el acoplamiento de la bombona de líquido y el tanque de almacenaje de los pellets. Todo ello configura una torre de 900 × 520 × 970 mm, cuya robustez alcanza los 98 kg de peso. A pesar de ello, ofrece prestaciones técnicas semejantes a las de las otras máquinas, refiriéndose a ambas tipologías de limpieza.

A excepción del modelo PT Combi, los equipos para proyección de nieve carbónica reducen considerablemente el peso total de la torre, a la vez que el consumo de materia prima impulsada por hora, en relación al DIB. Las dimensiones de los equipos más pequeños son 400 × 300 × 300 mm, con 15 kg de peso sin accesorios, lo que las hace muy ligeras. No obstante, también hay máquinas de mayores dimensiones y peso como PT Pro de PolarTech®, cuyo peso sobrepasa los 50 kg (53 kg), al igual que SJ-25 de Cryoclean® (59 kg). La diferencia de peso está ligada al caudal de aire de cada equipo. Los sistemas cuyo caudal volumétrico de aire se encuentra entre 1 y 6 m³/min, presentan valores más elevados de peso y dimensiones, a la vez que aumenta el consumo en kilogramos de CO₂ por hora.



Fig. 12 Equipo SJ-10. Producto de la empresa Cryoclean®.
Fuente: CRYOCLEAN, s.f.



Fig. 13 Equipo SJ-25. Producto de la empresa Cryoclean®.
Fuente: CRYOCLEAN, s.f.



Fig. 14 Equipo PT COMBI. Producto de la empresa
Fuente: PolarTech, s.f.

Tabla 3. Equipos y características para proyección de *snow blasting*. Maquinaria híbrida y unifuncional.

Empresa	Nombre del equipo	Dimensiones	Fuente de alimentación	Conexión de aire comprimido	Presión del aire	Caudal volumétrico del aire	Nivel de presión acústica	Capacidad del tanque	Pellets ø	Consumo de hielo seco	Consumo de CO2 líquido
CryoSnow®	SJ-25	580 x 370 x 470 mm	24 V DC	-	5 - 16 bar	1-6 m3/min	80-120 dB/A				0,4-1,5 kg/h
	SJ-10	400 x 300 x 300 mm	24 V DC	-	2 - 16 bar	0,3-2 m3/min	70-100 dB/A				0,1-0,3 kg/h
	CC-PXX	800 x 400 x 1300 mm	-	-	2 - 10 bar	-	-				-
Cryoclean®	SJ-10	400 x 300 x 300 mm	-	-	5 - 16 bar	0,3-2 m3/min	80-110 dB/A				0,1-0,3 kg/h
	SJ-25	620 x 490 x 970 mm	-	Normativa DIN 3489	2 - 16 bar	1-6 m3/min	80-110 dB/A				0,4-1,5 kg/h
PolarTech®	PT Pro	710 x 520 x 970 mm	110V-230V / AC 50-60 Hz	-	2 - 10 bar	1-5 m3/min	60-120 dB/A	25 kg	Ø -	0-50 kg/h	±0,25-±1,5 kg/h
	PT Combi	900 x 520 x 970 mm	110V-230V / AC 50-60 Hz	-	2 - 10 bar	1-5 m3/min	60-120 dB/A				±0,25-±1,5 kg/h

Nota. Autoría propia en base a las Fichas de Producto de las empresas.



Fig. 15 Proyección de CO₂ sobre una superficie esmaltada. Fuente: RM Contractors, 2020.

6. 3 REVISIÓN DE LOS SECTORES INDUSTRIALES QUE SE EMPLEA. CARACTERÍSTICAS DE LAS MÁQUINAS EN FUNCIÓN DE LOS USOS.

El planteamiento de este tipo de limpieza surge desde la necesidad de reducir costes, tiempos de exposición, toxicidad, retención, evitar la retirada del material depositado por el propio método o el desmontaje de la maquinaria. Por lo tanto, a pesar de que todos los sectores compartan requerimientos, las características de una misma máquina se verán modificados o alterados en función de las necesidades específicas de la labor. Para la selección de parámetros se tendrá en cuenta la tipología de sustrato a remover, el acceso, la morfología de la superficie y la zona que abarca (Fig. 15).

Las aplicaciones de la limpieza criogénica alcanzan gran variedad de sectores. Habitualmente se usa el hielo seco en la industria de la alimentación, a través del transporte de alimentos, conservación de materias primas o refrigeración de los mismos, además de aplicaciones en la hostelería para la elaboración de platos. Su uso en el mundo del espectáculo también está muy extendido, ya que se emplea como attrezzo simulador de niebla. La industria farmacéutica encuentra su utilidad como preservativo de reactivos, tanto para almacenaje como para el transporte de muestras, además de tratamientos como la microtomía y la liofilización, o su uso como medio para la esterilización de cabinas y zonas de trabajo. En paralelo, la química se aprovecha de los recursos del CO₂ sólido para el enfriamiento en pocos segundos de plantas y reactores o para el testado de productos en el laboratorio. En la producción de caucho y plástico tampoco se descarta su uso, con el que se obtienen los desbarbados y las moliendas criogénicas, mientras que en la metalurgia pueden llevarse a cabo cortes parciales de aleaciones o la propia limpieza criogénica de superficies metálicas (Nippon Gases, 2019).

En cuanto a la caracterización del material que se pretende eliminar, encontramos escaso interés en el sector industrial por desarrollar un estudio compositivo que permita conocer con exactitud la naturaleza del mismo. En la mayoría de casos, las empresas promocionan los usos de la limpieza criogénica por sectores industriales, incidiendo en la adaptabilidad de la máquina a los depósitos más habituales dentro de cada producción.

Desde el interés por demostrar la fiabilidad y practicidad del método, incluyen breves reseñas sobre la tipología de material a remover. En primer lugar, es más habitual que se discrimine por la afinidad al agua, como sería el caso de revestimientos de cal sobre una fachada, como materia hidrófila; o acumulación de lubricante en los engranajes de máquinas de producción, cuya naturaleza es únicamente lipófila. Por otro lado, interviene la dureza del sólido, diferenciando una capa de cemento frente a otra con restos de adhesivos, gomas o tintas de impresión. En tercer lugar, se atiende al nivel de estratificación del sedimento, compacto o parcialmente pulverulento, aplicado a costras o restos de hollín y polvo medioambiental. También se atienden aspectos como el espesor de la capa, aplicable a la eliminación de esmaltes sobre matrices metálicas o grandes acumulaciones mixtas de grasa, polvo y otros restos de producción. Mientras tanto, toma igual importancia la superficie de trabajo. En este caso, se refiere a grandes superficies lisas y homogéneas, en contraposición a aquellas que presentan cierta rugosidad o morfología limitante para el acceso del chorro de hielo seco a los intersticios, como sería el caso de máquinas de producción con acoples, circuitos o conductos entrelazados; muros de piedra porosa o techumbres.

Sobre cada una de estas diferenciaciones de estrato, se formula una adaptación en la máquina. Encontraremos modificaciones en los componentes, los valores de presión, el tamaño del pellet y la cantidad de hielo proyectado por minuto. No obstante, los dispositivos más comunes, tan solo permiten adaptar la boquilla y la presión del aire, pudiendo acoplar manualmente placas de extrusión que reduzcan el tamaño del pellet. A su vez, la máquina AERO2 PCS 60 de la empresa Cold Jet®, cuenta con un monitor que permite crear perfiles de limpieza, facilitando su reproductibilidad. En él se contempla el ajuste específico de la presión del chorro, el tamaño de partícula y la tasa de alimentación, además de aportar mediciones sobre los niveles del depósito y la salud de la máquina, entre otros. Esto conlleva un gran avance hacia la sistematización y reproductibilidad de los procesos de limpieza criogénica. Registrando los valores, se facilitan las diferentes conjugaciones de los parámetros facilitando una mejora crítica de los resultados obtenidos en la limpieza.

La unidad de medición de la presión del chorro es el bar (Bares), aunque en el sistema de medición anglosajón se representa como PSI (Pound per Square Inch). La

fuerza del chorro contra el estrato interviene directamente sobre los niveles de abrasión del sistema. A mayor presión, mayor es la incidencia sobre el estrato, aunque de ello también depende el tamaño de partícula. Las dimensiones del pellet se reflejan en milímetros. Habitualmente presentan un rango inferior a los 3 mm, pudiendo llegar a alcanzar los 0,3 mm en máquinas que contengan accesorios o sistemas de fragmentación de hielo seco integrados. Una talla mayor de pellet proyectado facilitará la descohesión del estrato, incrementando su fragilidad al mantenerse más tiempo en el material hasta sublimar. Un tamaño menor, garantiza mayor control sobre la salvaguarda de la matriz, garantizando limpiezas suaves y alargando tiempos de exposición (Kohli & Mittal, 2019).

Por último, el éxito de la limpieza dependerá de la tasa de alimentación y el caudal de aire, cuyo ajuste en la selección de parámetros los vincula directamente entre sí. En cuanto al primero, nos referimos en kilogramos por hora (kg/h) o libras por minuto (lb/min) a la cantidad en peso de pellets empleados durante un tiempo determinado. Esto influirá en la autonomía de la máquina, vinculado a la capacidad del tanque, y en la agresividad de la limpieza. Su vinculación con el caudal del aire, expresado en m³/min, es directamente proporcional. Esto responde a que cuanto mayor sea el caudal volumétrico del aire de la boquilla, los valores en el rango de la tasa de alimentación también lo serán (Fig. 16).

La regulación de todas ellas influirá en la elección de los acoples intercambiables del mango de la manguera. En el mercado encontramos boquillas rectas, angulares y curvas, cuya boca de proyección puede ser cilíndrica o de abanico plano (Fig. 17 y 18). La longitud y el diámetro son muy variables, desde 55 mm hasta 1 metro de longitud y diámetros <1 cm. El accesorio se encuentra en diversos materiales como aluminio, plástico, acero inoxidable y metales refractarios, ocasionalmente combinados entre sí (Fig. 19). En superficies delicadas se recomiendan las boquillas de bajo caudal, cuyo haz de proyección permita trabajar de forma controlada sobre una zona pequeña (Fig. 20 y 21) (Kohli & Mittal, 2019).



Fig. 16 Pantalla de control del equipo AERO2 PCS 60. Valores ajustables del perfil: Fuente: Cold Jet, 2019.



Fig. 17 Boquilla recta y boquilla curva. Fuente: Cold Jet, 2019.



Fig. 18 Boquilla cilíndrica y boquilla de abanico plano. Fuente: Cold Jet, 2019.



Fig. 19 Boquilla de plástico y boquilla de metal refractario. Fuente: Cold Jet, 2019.



Fig. 20 Boquillas de bajo caudal. Fuente: Cold Jet, 2019.



Fig. 21 Boquillas de alto caudal. Fuente: Cold Jet, 2019.



Fig. 22 Puerta del hangar de la aerolínea American Airways (Texas). Fuente: EverGreene , s.f.

6. 4 REVISIÓN DE LOS USOS Y APLICACIÓN EN EL ÁMBITO DE LA RESTAURACIÓN DE PATRIMONIO.

La limpieza criogénica se ha empleado para la eliminación de estratos sobre soportes cuya dureza sea mayor a la del film a remover, tratando de minimizar el impacto destructivo que esta técnica pueda ejercer sobre la materia a conservar (Piening & Schwarz, 1998).

En la limpieza de grandes superficies, como el patrimonio inmueble, la limpieza criogénica permite reducir procesos de intervención prolongados y costosos. No obstante, el control que puede ejercerse sobre la acción del dióxido de carbono sólido al impactar contra la superficie, permite conservar los rasgos propios de decorados y acabados estéticos de las superficies arquitectónicas. Esto resultó de suma importancia en tres intervenciones descritas por Kohli (2019), refiriéndose en primer lugar a la restauración de la puerta del hangar de la aerolínea American Airways (Texas), diseñada en 1933 en aluminio y estilo Art Déco (Fig. 22). Lo mismo describe para la decoración metálica de la terminal Union de Cincinnati, en Ohio o la fuente de bronce de la Galería Nacional de Arte de Washington, D.C. En los tres casos de estudio, pudieron removerse depósitos minerales, restos de silicona o suciedad medioambiental sin alterar la historicidad del inmueble (Tabla 4) (Kohli & Mittal, 2016).

En objetos patrimoniales cerámicos y metálicos también ha podido demostrarse su eficacia. El Museo Estatal y Conmemorativo de Auschwitz-Birkenau en Oswięcim (Polonia), procedió exitosamente con la limpieza de los cuencos y las cucharas de los prisioneros del campo de concentración (Cold Jet, 2011). También fue efectivo su uso sobre otros bienes metálicos como la malla de los cascos militares orientales del Museo Colección Wallace de Londres (Fig. 23) (Cutulle & Kim, 2015).



Fig. 23 Cascos militares orientales del Museo Colección Wallace de Londres. Fuente: Cutulle & Kim, 2015.



Fig. 24 *Bronze Form*, Henry Moore, 1986. Fuente: Getty Iris, 2012.



Fig. 25 *Bronze Form*, Henry Moore, 1986. Fuente: Getty Iris, 2012.

La precisión del método permite la conservación de pátinas metálicas finas en obras donde se combinan materiales orgánicos e inorgánicos. Esto se demostró durante la limpieza de una espada japonesa Wakizashi, del Periodo Edo, perteneciente al museo de la Universidad de Pennsylvania. El objeto estaba compuesto por cordones de seda y piel trenzados sobre una base metálica. En este caso, la empuñadura de cobre presentaba corrosión metálica y una pátina original negra de pocas micras de espesor, testearon la limpieza criogénica para la eliminación de depósitos de suciedad y productos de corrosión. Los resultados de la intervención demostraron la conservación de dicha pátina, además de mantener los defectos de uso propios de la manipulación del objeto tanto en el estrato metálico como en los cordones de piel y seda (Smithsonian American Art Museum, 2015). No obstante, modificando los parámetros de aplicación, su uso también puede extenderse a la eliminación de recubrimientos. La escultura *Bronze Form* (1986) de Henry Moore presentaba un recubrimiento acrílico-uretano transparente aplicado sobre la matriz de bronce (Getty Iris, 2012). El polímero acrílico requería ser sustituido y pudo eliminarse sin comprometer la superficie del soporte.

Otras aplicaciones en bienes compuestos por materiales de distinta naturaleza se ejemplifican sobre la colección Josep Cornell del Smithsonian American Art Museum. El chorro de hielo seco se aplicó sobre muelles de acero, piezas de plata con alteraciones producidas por carbonatos, una caja de cartón cubierta de polvo con aplicaciones plásticas y una caja, posiblemente de policarbonato, con una grave acumulación de suciedad adherida a la superficie (Smithsonian American Art Museum, 2015).

La efectividad de esta técnica sobre materiales plásticos permite su aplicación sobre obras de arte contemporáneo como *Model* (1967), de Robert Morris (Fig. 26). El artista realizó una serie de 200 esculturas realizadas en butirato de acetato de celulosa (CAB), cuyas características monocromáticas requieren especial cuidado y atención en las labores de conservación de las piezas. La obra presentaba elevada suciedad superficial y un pasmado general. Esta apariencia blanquecina estaba producida por exudaciones cristalinas ubicadas sobre la superficie, pudiendo tratarse de migraciones de plastificante. Los análisis químicos de las muestras tomadas no fueron concluyentes. Se aplicó la limpieza criogénica en los procesos de



Fig. 26 *Model*, Robert Morris, 1967. Fuente: Shockey, 2009



Fig. 27 Antes de la limpieza. Fuente: Shockey, 2009.

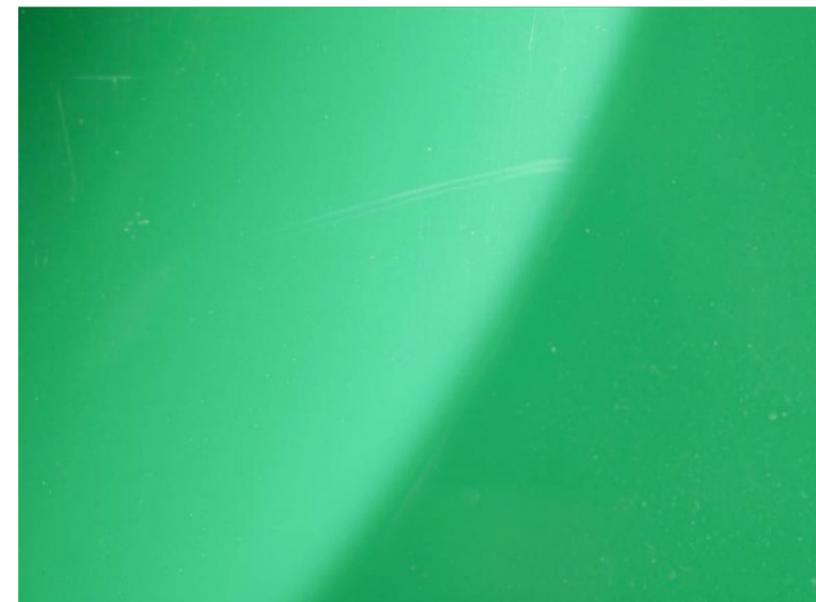


Fig. 28 Después de la limpieza. Fuente: Shockey, 2009.

limpieza de la obra, recuperando la coherencia estética de la escultura (Fig. 27 y 28) (Shockey, 2009). Otro ejemplo de aplicación sobre polímeros sintéticos es *Untitled* (1974), de Frederick Eversley (Fig. 29). Esta obra de 49,7 cm de diámetro por 16,6 cm de profundidad, está elaborada en resina de poliéster y representa una lente de grandes dimensiones. Estaba repleta de huellas dactilares y suciedad superficial, comprometiendo el acabado especular de la superficie. Ambas obras se encuentran conservadas en el Smithsonian American Art Museum (Smithsonian American Art Museum, 2015).

La limpieza por impacto de hielo seco es también efectiva en la remoción de partículas en materiales patrimoniales celulósicos, incluyendo partículas de pocas micras integradas en las superficies del papel. El estudio cualitativo de la aplicación sobre diferentes probetas, concluyó favorablemente, sin apreciar ningún tipo de alteración mecánica u óptica en el soporte. Su uso puede resultar útil en zonas de difícil acceso como los intersticios entre páginas (Ludmila Mašková et al., 2021). La intervención en la Oficina de Registro del Condado de Sevier en Richfield (Utah) es un ejemplo de ello. Se produjo un incendio que provocó el depósito de hollín y otros residuos sobre libros y registros históricos de los siglos XIX y XX. El dióxido de carbono sólido permitió la eliminación rápida y eficaz de dichos restos (aproximadamente seis libros por hora), sin alterar los materiales orgánicos de portadas y pliegos (Kohli & Mittal, 2016).

Se han llevado a cabo propuestas para la remoción de grafitis sobre varios tipos de superficies. El Instituto de Investigación y Asistencia Técnica y la Agencia de Protección Ambiental ha combinado recientemente el uso de hielo seco y productos de aceite de soja para la eliminación de grafitis en San Francisco (EE. UU.) (KQED, 2014; Sanmartín et al., 2014). Las lacas acrílicas se pueden quitar de las superficies metálicas sin dañar la pátina. No obstante, para los soportes de piedra, el estrato de polímero sintético puede adelgazarse, aunque exista riesgo de abrasión para la eliminación de los remanentes de estrato filmógeno depositado en los poros de la superficie pétreo (Piening & Schwarz, 1998).

En otros casos de estudio, la remoción de estratos de dureza similar al soporte ha concluido con buenos resultados. Ejemplo de ello es la eliminación de un film cero-resinoso sobre madera de conífera. Se aplicó en el palacio Nuevo de Schleißheim, edificio histórico situado al norte de Múnich, construido entre 1701 y 1726. Se realizó la limpieza de los suelos de marquetería del complejo palaciego, los cuales presentaban estratos protectores y depósitos de suciedad, intercalados entre sí. La limpieza criogénica permitió la remoción del estratificado, sin alterar la morfología que presentaba la madera tras varios siglos de uso. Las mediciones de temperatura superficial del estrato lúneo tomadas tras el impacto del hielo seco, confirmaron -12C, alcanzando los valores ambientales en pocos segundos. Conclu-

Tabla 4. Casos de estudio. Aplicación de la limpieza criogénica sobre diferentes estratificados.

SOPORTE	ESTRATO A REMOVER	CASO DE ESTUDIO
Aluminio	Depósitos minerales y de suciedad medioambiental.	Puerta del hangar de la aerolínea American Airways (Texas), 1933.
Aluminio	Depósitos minerales y de suciedad medioambiental.	Terminal Union de Cincinnati (Ohio), 1933.
Bronce	Depósitos minerales y de suciedad medioambiental.	Fuente de la Galería Nacional de Arte (Washington, D.C.).
Bronce	Film acrílico-uretano.	<i>Bronze Form</i> (1986), Henry Moore.
Cobre	Productos de corrosión, estratos protectivos (vaselina y aceites) y suciedad medioambiental.	Cascos militares orientales del Museo Colección Wallace de Londres.
Cerámica y metal	Depósitos de polvo y suciedad medioambiental.	Museo Estatal y Conmemorativo de Auschwitz-Birkenau en Oswięcim (Polonia).
Madera conífera	Estrato cero-resinoso y suciedad.	Marquetería palacio Nuevo de Schleißheim (Alemania), 1726.
Madera de conífera y frondosa	Estrato cero-resinoso y suciedad.	Nuevo Palacio de Bayreuth (Alemania), 1753.
Papel	Restos de hollín y depósitos de suciedad.	Documentos del siglo XIX y XX. Registro del Condado de Sevier en Richfield (Utah).
Resina de poliéster	Depósitos de polvo y suciedad medioambiental.	Frederick Eversley, <i>Untitled</i> , 1974.
Butirato de acetato de celulosa (CAB)	Depósitos de polvo, suciedad ambiental y migraciones de tensoactivo.	<i>Model</i> (1967), Robert Morris.

Nota. Autoría propia en base a los casos de estudio descritos.

yeron que el choque térmico no había producido alteraciones en la microestructura de la madera, evaluando la intervención como exitosa (Piening & Schwarz, 1998).

Los óptimos resultados obtenidos tras la limpieza con hielo seco en el palacio de Schleißheim, propiciaron su aplicación en otro edificio de similares características. El Nuevo Palacio de Bayreuth, fue reconstruido en 1753 y se encuentra ubicado al sureste de Alemania. La limpieza de este segundo suelo confirmó la efectividad del método. En este caso, la intervención se realizó sobre madera de conífera y de frondosa, adaptando los parámetros de la limpieza en función de la dureza de cada soporte leñoso. Según los autores, la limpieza sobre madera de conífera dilató los tiempos del tratamiento, entre 5 y 7 metros por hora, mientras que el tiempo promedio de limpieza para la madera de roble fue entre 8 y 10 metros por hora (Piening & Schwarz, 1998)



Fig. 29 *Untitled*, Frederick Eversley, 1974. Fuente: Smithsonian American Art Museum, s.f.

7

Propuestas de aplicación y mejoras del método

La proyección de hielo seco para la limpieza de material patrimonial encuentra algunas limitaciones comunes al resto de métodos mecánicos (Bertasa et al., 2014). Se trata de una limpieza cuya efectividad se ve comprometida por el tipo de unión entre estratos. Produce fundamentalmente la ruptura de enlaces físicos, producidos por fuerzas de Van der Waals, uniones electrostáticas o fuerzas capilares. Refiriéndose a la remoción de estratos unidos débilmente al soporte, no permite la separación de uniones químicas más fuertes (Sherman, 2007).

Algunos autores consideran que se trata de un tratamiento cuya garantía reside en la eliminación de compuestos orgánicos como hidrocarburos (Liu et al., 2011; Sherman, 2007), principalmente ligeros como grasa facial o huellas dactilares (Shockey, 2009). No obstante, también es aplicable a partículas y otro tipo de estratos, siempre y cuando su unión con el soporte no sea química (Smithsonian American Art Museum, 2015).

Existen ciertos requisitos básicos que deben atenderse a la hora de aplicar la limpieza criogénica. En primer lugar, la superficie del objeto debe presentar cierta dureza (Sherman, 2007), refiriéndose a aquellos materiales capaces de recibir el impacto del hielo seco sin deformarse. Si el yield point del soporte es inferior a 70 PSI, probablemente sufra fracturas (Smithsonian American Art Museum, 2015).

Por otro lado, convendrá que la respuesta del material a una depresión momentánea de la temperatura superficial sea satisfactoria y de ello dependerá la temperatura de transición vítrea (T_g) del soporte (Smithsonian American Art Museum, 2015). Sobrepasar los valores mínimos de la T_g de un material provoca pérdida de flexibilidad y estado vítreo (Mecklenburg et al., 2005), cuyo impacto sobre la obra puede ser irreversible, comprometiendo su conservación futura. En este punto, deberán realizarse mediciones térmicas previas que permitan conocer con exactitud la temperatura a la que se verá expuesta la superficie de la pieza. Estos valores se verán influenciados por el tipo de material, las condiciones de conservación del proyectil, el tiempo de exposición de la superficie a la limpieza y la temperatura medioambiental de la sala. Algunos autores han registrado valores mínimos de 8C, mediante el uso de la cámara térmica FLIR 320EX, impactando el haz de hielo seco directamente sobre la lente de medición (Shockey, 2009). No obstante, otros registraron -12C en soportes



ligneos (Piening & Schwarz, 1998), mientras que en mediciones tomadas sobre papel, se registraron de -15C a -7C al finalizar la limpieza, incrementándose de forma constante hasta 5C tras 14 segundos de reposo (Ludmila Mašková et al., 2021).

En cuanto a las condiciones de la zona de trabajo, es conveniente intervenir con niveles bajos de humedad. Al aplicarse valores de temperatura inferiores a los del material, es común que se produzca condensación de vapor en la superficie. Esto es evitable si se aplica en ambientes secos, en combinación con una corriente de aire constante. No obstante, al sustituir el aire por un gas inerte, como nitrógeno, se puede repeler la humedad y reducir la condensación y para ello sería conveniente trabajar en una cámara hermética (Cano, 2001). A su vez, la pieza debe mantenerse sujeta a un soporte de anclaje que evite su desplazamiento al recibir el impacto del dióxido de carbono sólido (Smithsonian American Art Museum, 2015).

El ajuste de los parámetros de la máquina también alterará la efectividad de la limpieza. Estudiar la presión y distancia de disparo, representa una parte fundamental de la limpieza y debe atenderse a la hora de asegurar buenos resultados (Smithsonian American Art Museum, 2015). Por ello, un incremento en la fuerza de impacto de las partículas de hielo seco, permitirá la eliminación de contaminantes de tamaño submicrónico (Liu et al., 2011). No obstante, los films que se encuentren contenidos en la estructura del material, difícilmente podrán ser eliminados sin producir daños en la matriz sustentante (Bertasa et al., 2014), aunque para ello podría reducirse la presión y diámetro del haz. Se ha demostrado la efectividad de la limpieza para la eliminación de partículas de tamaño inferior a una micra, ubicadas en los intersticios de las fibras de un soporte celulósico con 30 años de antigüedad. A partir de análisis cuantitativos, demostraron que no se habían producido alteraciones, mecánicas y ópticas, en el papel (Ludmila Mašková et al., 2021).

La limpieza de depósitos se produce por el desplazamiento provocado por el impacto del haz. No existe residuo propio del sistema de limpieza, no obstante, debe tenerse en cuenta el remanente del material eliminado. El material propulsado tiende a empujar las partículas y éstas deben capturarse antes de que vuelvan a depositarse sobre la superficie. Este problema puede resolverse con extractores, métodos de succión o materiales ligeramente pegajosos que atrapen las partículas sin dejar resi-

duos. No obstante, existe la posibilidad de evitar la redeposición en la propia limpieza, siguiendo un patrón centrífugo desde el centro hacia el perímetro, en forma de espiral (Shockey, 2009).

La criolimpieza es un método *eco-friendly* cuyo empleo debe llevarse a cabo con las medidas de seguridad pertinentes. La liberación de dióxido de carbono en el ambiente puede suponer un riesgo para el operador. El espacio debería estar convenientemente ventilado y se recomienda el uso de sistemas de medición de concentraciones de CO₂, como medida de precaución y notificación en el caso de que se rebasen los niveles de seguridad para la salud humana (Smithsonian American Art Museum, 2015). Una persona puede exponerse a 5000 ppm durante 8 h, correspondiendo con una jornada laboral completa, mientras que, para exposiciones puntuales, es segura una concentración de 30.000 ppm durante 15 min (Cano, 2001). En cuanto a los EPI necesarios, debe contarse con gafas de protección y mascarilla, al levantarse partículas y fragmentos de estrato eliminado; y cascos de protección auditiva, debido a los decibelios que alcanza la máquina en funcionamiento (Shockey, 2009).

Por último, cabe destacar la importancia de la experiencia del operador que aplica el sistema (Fig. 30). No debe olvidarse de que el método requiere de la pericia y ojo crítico del conservador-restaurador, siendo un elemento fundamental de todo el proceso. Evaluar empíricamente el empleo de la técnica, permite minimizar la condensación y prever qué sistema se aplica para evitar la deposición de las partículas eliminadas sobre las zonas limpias (Shockey, 2009).



Fig. 30 Aplicación de la limpieza criogénica por un operador. Fuente: ICEsonic, 2021.

8

Conclusiones

La limpieza criogénica supone una alternativa que apoya por completo la innovación tecnológica en beneficio del desarrollo de propuestas para una restauración patrimonial sostenible. Su inclusión ofrece una alternativa a los métodos de limpieza donde la toxicidad, el residuo secundario o la retención derivada de la acción disolvente impactan negativamente en el personal técnico, el entorno y el bien cultural.

A expensas de desarrollar un estudio empírico que lo demuestre, los parámetros de uso que contemplan la mayoría de torres criogénicas son perfectamente adaptables a los requisitos de precisión y eficiencia reclamables para su aplicación sobre material de interés cultural. En ello consiste tanto la adaptación técnica de los valores de presión, caudal y tamaño del pellet, como la elección de una boquilla que responda ante la extensión de la superficie a la vez que permita el acceso a los diferentes planos de la pieza.

A su vez, la selectividad del método podrá validarse a través del estudio compositivo particular de cada estratificado. Teniendo en cuenta los aspectos necesarios para estimar la ruptura de enlaces adecuada, debería principalmente evaluarse la temperatura de transición vítrea (Tg), la morfología superficial, la dureza del estrato y la composición química de cada material; atendiendo a su vez a su correlación con el que le subyace. La limpieza por niveles dependerá de cuan semblantes sean las capas y el tipo de unión que exista entre ellas. La remoción adecuada de un estrato normalmente responderá a un soporte cuya dureza sea superior a la del material indeseado, donde la unión entre estos sea física y la temperatura de transición vítrea (Tg) del estrato conservable asegure su resistencia al impacto térmico del sistema.

La difusión de los resultados obtenidos en esta investigación, contribuye a la apertura de una línea de investigación enfocada al estudio de metodologías de limpieza sostenibles y respetuosas con el planeta, alentando a la comunidad a estudiar e incorporar estos métodos en sus propuestas de restauración. Divulgar este trabajo no solo comporta una sensibilización medioambiental, sino que también supone una mejora técnica que resuelve casuísticas vinculadas al residuo no volátil depositado en superficie o procesos que requieren dilatados tiempos de trabajo.



La inclusión de la criolimpieza en el abanico de métodos para la intervención sobre bienes culturales es afín a los ODS 7, 8 y 9. Mejora la eficiencia energética debido a la reutilización de CO2 como subproducto de procesos industriales, haciendo un reaprovechamiento eficaz de recursos disponibles. La elaboración de pellets coopera con el reciclaje de material de desecho, incluyendo un acceso completamente inclusivo al material desde el que se consigue efectuar, entre otros usos, un servicio de limpieza eficiente y de bajo impacto económico y medioambiental. La investigación de estos nuevos medios supone un progreso tecnológico para el sector patrimonial, resolviendo diversas problemáticas asociadas a los métodos actualmente disponibles; a la vez que amplía la gama de infraestructuras disponibles con el fin de modernizar nuestras intervenciones, haciéndolas más sostenibles.

Por otro lado, enlazado con el ODS 12 se obtiene una actualización de las acciones a favor de la reducción de residuos y la minimización de la gestión ecológica que de estos se deriva. Con ello fomentamos la conservación ambiental, sin contribuir a la liberación de sustancias altamente nocivas para el suelo, el agua y la atmósfera, con la intención de atenuar el impacto que ello conlleva para la salud. Esto supone una participación activa en la validación de modos de producción y consumo más sostenibles, propiciando la propagación de un análisis generalizado de las prácticas que se acometen en cada agrupación económica de profesionales, con la consecuente elaboración de informes y estudios que planteen nuevas estrategias aplicables a todas las áreas de trabajo.

Vincular la investigación en la universidad a la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, contribuye a la cimentación de nuevos principios y estrategias de I+D+i que promuevan un cambio en las estructuras económicas y sociales por la protección medioambiental. Relacionado con el ODS 13, los recursos invertidos en el estudio de nuevos medios, productos y sistemas que abogan por resolver impedimentos vinculados a la reducción de la nocividad en nuestras intervenciones, expanden su impacto a otros sectores y contribuyen a una importante misión global. Fomentar la educación y sensibilización medioambiental en espacios institucionalizados dedicados a la difusión de conocimientos, favorece la prevención y mitigación de los efectos del cambio climático, alentando a los investigadores a contribuir en el estudio de nuevas metodologías que cooperen con el desarrollo sostenible y minimicen nuestro impacto en el planeta.

9

Bibliografía

- Aguado, E., Bianchi, C., García, M., & de Frutos, M. J. (2019). La acidez y salinidad de los óleos TITAN®, su pH y conductividad en el contexto de la intervención con métodos acuosos. *Conservación de Arte Contemporáneo 20a Jornada*, Diciembre, 79–88.
- Anastas, P. T., y Warner, J. C. (1998). *Green Chemistry: Theory and Practice*. University Press.
- Aquila Triventek. (s.f.). *Equipo de limpieza criogénica BL-60*. [PDF]. Direct Industry. <https://pdf.directindustry.es/pdf-en/aquila-triventek-s/blaster-bl60/30971-626536.html>
- Asamblea General de las Naciones Unidas. (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. *Seguimiento de Los Resultados de La Cumbre Del Milenio*, 14–27. <https://doi.org/10.18268/bsgm1908v4n1x1>
- Balliana, E., Ricci, G., Pesce, C., y Zendri, E. (2016). Assessing the value of green conservation for cultural heritage: Positive and critical aspects of already available methodologies. *International Journal of Conservation Science*, 7(SpecialIssue1), 185–202.
- Barros, J. M. (2001). Los efectos del proceso de limpieza en las estructuras pictóricas. *PH: Boletín Del Instituto Andaluz Del Patrimonio Histórico*, 36, 53–61. <https://doi.org/10.33349/2001.36.1221>
- Barros, J. M. (2005). *Imágenes y sedimentos: la limpieza en la conservación del patrimonio pictórico*. Institució Alfons el Magnànim-Diputació de València.
- Barros, J. M. (2015). Re-evaluating the roles of the cleaning process in the conservation of paintings. *Ge-Conservacion*, 7, 14–23. <https://doi.org/10.37558/gec.v7i0.210>
- Bertasa, M., Cavaleri, T., Chiantore, O., Croveri, P., Demmelbauer, M., Nervo, M., Giovagnoli, A., Malasomma, M., Poli, T., y Russo, D. (2014). Study and application of a cryoblasting method for the cleaning of stone surfaces. *Art'14 11th International Conference on Non-Destructive Investigations and Microanalysis for the Diagnostics and Conservation of Cultural and Environmental Heritage*, 11–19.
- Bosch, P., Lustrato, G., Zanardini, E., y Ranalli, G. (2014). Biocleaning of Cultural Heritage stone surfaces and frescoes: which delivery system can be the most appropriate? *Annals of Microbiology*, 65(3), 1227–1241.
- Bosch, P., Ranalli, G., Joseph, E., y Ripp, S. (2014). The safety of biocleaning technologies for cultural heritage. *Frontiers in Microbiology*, 5, 1–3. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00155>
- Caldararo, N. (2005). Effects of Cleaning and Regard for Cleaning Goals: Eleven Years Later. *AIC Objects Specialty Group Postprints*, 12, 136–153.
- Cano, F. (2001). Carbon dioxide dry ice snow cleaning. En B. Kanegsberg (Ed.), *Handbook for critical cleaning* (pp. 329–336). Boca Raton: CRC Press.
- Casoli, A., Di Diego, Z., & Isca, C. (2014). Cleaning painted surfaces: evaluation of leaching phenomenon induced by solvents applied for the removal of gel residues. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(23), 13252–13263. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2658-5>
- Cold Jet. (Febrero de 2011). *Dry ice cleaning is used to clean metal and ceramic artifacts before they are displayed at Auschwitz-Birkenau Memorial*. Recuperado el 20 de julio de 2021 de <https://www.coldjet.com/es/resources/auschwitz-memorial-historical-restoration/>
- Cold Jet. (2019). *AERO2-PCS 60. Operator & Maintenance Manual*. [Archivo PDF]. Cold Jet https://www.coldjet.com/wp-content/uploads/0471_SPEC-SHEET_AERO2_PCS60_2020_A4_SP_sv.pdf
- Cold Jet. (2021). *Equipos de Limpieza con Hielo Seco*. Recuperado el 22 de junio de 2021 de <https://www.coldjet.com/es/la-limpieza-criogenica/>

- Colomina, A., Guerola, V., y Moreno, B. (2020). *La limpieza de superficies pictóricas. Metodología y protocolos técnicos*. Ediciones Trea.
- Cotec, F. (2010). Innovación en el sector del Patrimonio histórico. En *Informes sobre el sistema de innovación español*. Fundación Cotec para la Innovación Tecnológica.
- Cremonesi, P. (2014). *El ambiente acuoso para el tratamiento de obras policromas*. Il Prato.
- Cremonesi, P., y Signorini, E. (2016). *Un approccio alla pulitura dei dipinti mobili*. Il Prato.
- Cremonesi, P. (1999). *L'uso degli enzimi nella pulitura di opere policrome*. Il Prato.
- Cutulle, C., y Kim, S. (2015). Dry ice blasting in the conservation of metals: a technical assessment as a conservation technique and practical application in the removal of surface coatings. *Objects Specialty Group Postprints (American Institute for Conservation of Historic and Artistic Works. Objects Specialty Group)*. 22, 77-100.
- Di Turo, F., y Medeghini, L. (2021). How Green Possibilities Can Help in a Future Sustainable Conservation of Cultural Heritage in Europe. *Sustainability*, 13(3609), 1-14. <https://doi.org/10.3390/su13073609>
- Doménech, M. T. (2013). *Principios físico-químicos de los materiales integrantes de los bienes culturales*. Editorial Universitat Politècnica de València.
- Dominguez, M., Gauto, J., y Guerreiro, R. (2011). *Limpieza Criogénica*. (Proyecto final) Repositorio Institucional Abierto – Universidad Tecnológica Nacional.
- EverGreene. (s.f.). *1930's American Airways Hangar*. Recuperado el 19 de julio de 2021 de <https://evergreene.com/projects/american-airways-hangar/>
- Fundación Europea Sociedad y Educación. (2021). *El Label-ODS*. Recuperado el 19 de julio de 2021 de <http://www.sociedadeducacion.org/ecocultura/label-ods/>
- Posner, K. (Mayo de 2012) *Conservation Comes Outdoors for Henry Moore's "Bronze Form"*. Getty Iris blog. <http://blogs.getty.edu/iris/conservation-comes-outdoors-for-henry-moores-bronze-form/>
- Gonçalves, B. (Octubre 2018). An Introduction to Green Chemistry. *Sustainability in Conservation*. <https://www.sustainabilityinconservation.com/post/an-introduction-to-green-chemistry>
- Hoshaw, L. (Noviembre de 2013). *Soy and Dry Ice Among San Francisco's New Tricks to Banish City Graffiti*. KQED. <https://www.kqed.org/science/10953/soy-and-dry-ice-among-san-franciscos-new-tricks-to-banish-city-graffiti>
- ICEsonic. (2021). *Restauración y remediación*. Recuperado el 19 de julio de 2021 de <https://icesonic.com/es/dry-ice-blasting/8Am-restauracion-y-remediacion>
- Iglesias, M. Á. (2014). Limpieza ideal y limpieza real en Patrimonio Arquitectónico. *Ge-Conservacion*, 6, 57-67.
- Jassim, A., y Khalaf, H. (2020). Dry Ice Cleaning Based Sustainable Cleaning Technology for Oil and Gas Storage Tanks. En R. Abd-Alhameed, R. Zubo, y O. Ali (Eds.), *Proceedings of the 1st International Multi-Disciplinary Conference Theme: Sustainable Development and Smart Planning, IMDC-SDSP 2020*. (EAI) Cyberspace. <https://doi.org/10.4108/eai.28-6-2020.2298246>
- Jerez, E.J. (2020). *Estudio y revisión de tratamientos de limpieza para la eliminación de concreciones de carbonatos sobre pintura mural arqueológica*. (Trabajo Final de Grado, Universidad de Granada) <https://digibug.ugr.es/handle/10481/63017>
- Khandekar, N. (2004). Research into Potential Problems Arising from the Use of Aqueous Cleaning Systems. En *Solvent Gels for the Cleaning of Works of Art: The Residue Question* (Vol. 1, pp. 12-17). The Getty Conservation Institute. http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/books/solvent_gels_for_cleaning.html
- Kohli, R. (2019). Applications of Solid Carbon Dioxide (Dry Ice) Pellet Blasting for Removal of Surface Contaminants. En R. Kohli & K. L. Mittal (Eds.), *Developments in Surface Contamination and Cleaning: Applications of Cleaning Techniques* (Vol. 11, pp. 117-169). Elsevier. <https://www.elsevier.com/books/developments-in-surface-contamination-and-cleaning-volume-12/kohli/978-0-12-816081-7>
- Kohli, R., y Mittal, K. L. (2016). *Developments in Surface Contamination and Cleaning*. En *Developments in Surface Contamination and Cleaning* (Vol. 10). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/c2017-0-03847-8>
- Laudenbacher, K. (2010). Considerations of the Cleaning of Paintings. En M. F. Mecklenburg, A. E. Charola, y R. J. Koestler (Eds.), *New Insights into the Cleaning of Paintings Proceedings from the Cleaning 2010 International Conference Universidad Politécnica de Valencia and Museum Conservation Institute* (pp. 7-10). Smithsonian Institution Scholarly Press.
- Liu, Y.-H., Maruyama, H., y Matsusaka, S. (2011). Effect of Particle Impact on Surface Cleaning Using Dry Ice Jet. *Aerosol Science and Technology*, 45(12), 1519-1527. <https://doi.org/10.1080/02786826.2011.603769>
- Liu, Y.-H., y Matsusaka, S. (2013). Formation of Dry Ice Particles and Their Application to Surface Cleaning. *Eurozoru Kenkyu*, 28(2), 155-162. <https://doi.org/10.11203/jar.28.155>

- Ludmila, Smolík, J., Vávrová, P., Neoralová, J., Součková, M., Novotná, D., Jandová, V., Ondráček, J., Ondráčková, L., Křížová, T., Kocová, K., y Stanovský, P. (2021). Carbon dioxide snow cleaning of paper. *Research square*. <https://europepmc.org/article/ppr/ppr358786>
- Irvine, M. (2016). *Los Objetivos de Desarrollo Sostenible y las empresas*. DNV. Recuperado el 22 de julio de 2021 <https://www.dnv.es/feature/sdgs-business-action.html>
- Masschelein, L. (2004). *Los solventes* (Vol. 1). DIBAM. Centro Nacional de Conservación y Restauración. <https://www.cncr.gob.cl/sitio/Contenido/Publicaciones/4953:LOS-SOLVENTES>
- Maxwell, K., y Benneworth, P. (2018). The construction of new scientific norms for solving Grand Challenges. *Palgrave Communications*, 4(52). <https://doi.org/10.1057/s41599-018-0105-9>
- Mecklenburg, M. F., Tumosa, C. S., y Erhardt, D. (2005). The Changing Mechanical Properties of Aging Oil Paints. En P. B. Vandiver, J. L. Mass, y A. Murray (Eds.), *Materials Research Society Symposium* (pp. 13–24). Materials Research Society.
- Nippon Gases (2020). *Sanlce®*. Recuperado el 22 de julio de 2021 <https://nippongases.com/es-es/for-food-beverage/sanice>
- Nippon Gases (2019). *Aplicaciones*. Recuperado el 22 de julio de 2021 <https://hieloseco.es/applications>
- ONU. (2015a). *Objetivos de Desarrollo del Milenio. Informe 2015*. <https://www1.undp.org/content/undp/es/home/librarypage/mdg/the-millennium-development-goals-report-2015/>
- ONU. (2015b). *Objetivos y Metas de Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Ormsby, B., Kampasakali, E., y Learner, T. (2013). Surfactants and Acrylic Dispersion Paints: Evaluating Changes Induced by Wet Surface Cleaning Treatments. *Smithsonian Contributions to Museum Conservation*. <http://hdl.handle.net/10088/20503>
- Palla, F., Barresi, G., Giordano, A., Schiavone, S., Trapani, M. R., Rotolo, V., Parisi, M. G., y Cammarata, M. (2016). Cold-active molecules for a sustainable preservation and restoration of historic-artistic manufactures. *International Journal of Conservation Science*, 7(Special Issue 1), 239–246.
- Pérez, P. (2019). *Microemulsiones, Soluciones Micelares y emulsiones sin tensoactivos en la limpieza de pintura mural al fresco*. (Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València) <https://riunet.upv.es/handle/10251/124826#>
- Pérez, P., Regidor, J. L., y Roig, M. P. (2018). Microemulsiones vs Emulsiones sin tensoactivos. En R. Llamas y J. L. Alapont (Eds.), *Emerge 2018. Jornadas de Investigación Emergente en Conservación y Restauración de Patrimonio*. (pp. 146–152). Universitat Politècnica de València.
- Pérez, P., Regidor, J. L., y Roig, P. (2020). Sistema emulsionado sin tensoactivos como alternativa al uso de un solvent gel. *Conservar Patrimonio*, 34, 101–108. <https://doi.org/10.14568/cp2018051>
- Phenix, A. (2010a). Effects of Organic Solvents on Artists' Oil Paint Films: Swelling. En M. F. Mecklenburg (Ed.), *New Insights into the Cleaning of Paintings Proceedings from the Cleaning 2010 International Conference Universidad Politècnica de Valencia and Museum Conservation Institute* (pp. 69–76). Smithsonian Institution Scholarly Press.
- Phenix, A. (2010b). Effects of Organic Solvents on Artists' Oil Paint Films. En M. F. Mecklenburg, A. E. Charola, & R. J. Koestler (Eds.), *New Insights into the Cleaning of Paintings Proceedings from the Cleaning 2010 International Conference Universidad Politècnica de Valencia and Museum Conservation Institute* (pp. 29–30). Smithsonian Institution Scholarly Press.
- Piening, H., y Schwarz, R. (1998). Using low temperatures for cleaning surfaces. Three modes of application. *Restauo: Forum Für Restauratoren, Konservatoren Und Denkmalpfleger*, 104(4), 248–252.
- PolarTech. (s.f.). *PT COMBI. Datasheet*. [Archivo PDF] <https://polartech.dk/wp-content/uploads/2021/05/2019-02-PolarTech-DataSheet-Heavy-Duty-PT-PROsi.pdf>
- Pouli, P., Oujja, M., Castillejo, M., Oujja, M., Castillejo, M., y Castillejo, M. (2012). Practical issues in laser cleaning of stone and painted artefacts: optimisation procedures and side effects. *Appl Phys A*, 106, 447–464. <https://doi.org/10.1007/s00339-011-6696-2>
- Prati, S., Volpi, F., Fontana, R., Galletti, P., Giorgini, L., Mazzeo, R., Mazzocchetti, L., Samori, C., Sciutto, G., y Tagliavini, E. (2018). Sustainability in art conservation: A novel bio-based organogel for the cleaning of water sensitive works of art. *Pure and Applied Chemistry*, 90(2), 239–251. <https://doi.org/10.1515/pac-2017-0507>
- Reglamento 1907/2006 [REACH]. Relativo al registro, la evaluación y la restricción de las sustancias y preparados químicos, por el que se crea la Agencia Europea de Sustancias y Preparados. 30 de diciembre de 2006. *Diario Oficial de La Unión Europea*.

- Reina, A. (2009). *Eliminación de pinturas en aerosol sobre soportes porosos. Revisión de metodologías y nuevas propuestas*. (Tesis de Máster, Universitat Politècnica de València). <http://hdl.handle.net/10251/14508>
- RM Contractors. (2020). *Dry Ice Blasting*. Recuperado el 22 de julio de 2021 <https://www.specialistblastcleaning.co.uk/portfolio/dry-ice-blasting/>
- Saera, A. (2008). *Estudio comparativo de aplicaciones informáticas para el cálculo de parámetros de solubilidad. Triansol, Solvent Solver y Trisolv*. (Tesis de Máster, Universitat Politècnica de València) <http://hdl.handle.net/10251/13170>
- Saleh, H. M., y Hassan, A. I. (2021). Introduction to Green Chemistry. En G. Anilkumar & S. Saranya (Eds.), *Green Organic Reactions* (1st ed., pp. 1–14). Springer Singapore. <https://www.springerprofessional.de/en/green-organic-reactions/19013542>
- Salimbeni, R. (2006). Laser Techniques for Conservation of Artworks. *Archeometriai Műhely*, 1(May), 34–40. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.535.7271&rep=rep1&type=pdf>
- Sanmartin, P., Cappitelli, F., y Mitchell, R. (2014). Current methods of graffiti removal: A review. En *Construction and Building Materials* (Vol. 71, pp. 363–374). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.093>
- Sherman, R. (2007). Carbon Dioxide Snow Cleaning. *Particulate Science and Technology*, 25(1), 37–57. <https://doi.org/10.1080/02726350601146424>
- Shockey, L. H. (2009). Blow it off: Moving beyond compressed air with carbon dioxide snow. *Objects Specialty Group Postprints*, 16, 13–24.
- Signorini, E. (2010). Surface Cleaning of Paintings and Polychrome Objects in Italy: The Last 15 Years. En M. F. Mecklenburg, A. E. Charola, & R. J. Koestler (Eds.), *New Insights into the Cleaning of Paintings Proceedings from the Cleaning 2010 International Conference Universidad Politècnica de Valencia and Museum Conservation Institute* (pp. 17–22). Smithsonian Institution Scholarly Press. <https://doi.org/10.5479/si.19492359.3.1>
- Smithsonian American Art Museum. (s.f.). *Untitled*. Recuperado el 22 de julio de 2021 <https://americanart.si.edu/artwork/untitled-8138>
- Sherman, R., y Shockey, L. H. (25 de julio de 2015). *Ice Cold: Solid Carbon Dioxide Cleaning Symposium*. (Sesión 1) Smithsonian American Art Museum, Washington D.C. <https://americanart.si.edu/videos/conservation-symposium-ice-cold-solid-carbon-dioxide-cleaning-154409>
- Spur, G., Uhlmann, E., y Elbing, F. (1999). Dry-ice blasting for cleaning: Process, optimization and application. *Wear*, 233–235, 402–411. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00204-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00204-5)
- The Linde Group. (s.f.). *CRYOCLEAN® snow. SJ-10 CO 2 snow blasting machine. Datasheet*. [Archivo PDF], https://www.linde-gas.es/es/images/Datasheet%20CRYOCLEAN%20snow.%20SJ-10%20%28auto%29%20CO2%20snow%20blasting%20machine._tcm316-165676.pdf
- UNE-EN 17138 [Asociación Española de Normalización]. Conservación del patrimonio cultural, *Métodos y materiales para la limpieza de materiales inorgánicos porosos*. Julio 2019.
- Van der Molen, R., Joosten, I., Beentjes, T., y Megens, L. (2010). Dry ice blasting for the conservation cleaning of metals. *Metal 2010: Proceedings of the Interim Meeting of the ICOM-CC Metal Working Group*, 135–143.
- VVAA. (2013). Proyecto COREMANS: Criterios de intervención en materiales pétreos. Ministerio de Educación Cultura y Deporte. Ministerio de Educación Cultura y Deporte. <https://ipce.culturaydeporte.gob.es/difusion/publicaciones/libros-del-ipce/coremans.html>
- VVAA. (2015). Proyecto COREMANS: Criterios de intervención en materiales metálicos. Ministerio de Educación Cultura y Deporte. <https://ipce.culturaydeporte.gob.es/difusion/publicaciones/libros-del-ipce/coremans.html>
- VVAA. (2017). Proyecto COREMANS: Criterios de intervención en retablos y escultura policromada. Ministerio de Educación Cultura y Deporte. <https://ipce.culturaydeporte.gob.es/difusion/publicaciones/libros-del-ipce/coremans.html>
- Wolbers, R. (2000). *Cleaning painted surfaces: aqueous methods*. Archetype Publications.
- Zalbidea, M. A., Regidor, J. L., y Pérez, E. (2010). LA LIMPIEZA EN OBRAS DE ARTE. Conceptos básicos. *¿CÓMO HACER LA LIMPIEZA DE LA SUPERFICIE? Jornadas Técnicas, Materiales y Métodos para las Pinturas*. [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/68304/Zalbidea%3BPérez%3BRegidor - LA LIMPIEZA EN OBRAS DE ARTE. Conceptos básicos.pdf?sequence=1](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/68304/Zalbidea%3BPérez%3BRegidor%20-%20LA%20LIMPIEZA%20EN%20OBRAS%20DE%20ARTE.%20Conceptos%20básicos.pdf?sequence=1)

10

Índice de imágenes

- Fig. 1** Objetivos de Desarrollo Sostenible. Fuente: Fundación Europea Sociedad y Educación, 2021.
- Fig. 2** Esferas de intervención de los ODS. Fuente: Mark Irvine, 2016.
- Fig. 3** Objetivos de Desarrollo Sostenible vinculados a la investigación. Fuente: Fundación Europea Sociedad y Educación, 2021.
- Fig. 4** Clasificación de las técnicas analizadas. Fuente: Elaboración propia, 2021.
- Fig. 5** Sistema de elaboración de los pellets de hielo seco. Fuente: Cold Jet, 2021.
- Fig. 6** Intervención del hielo seco sobre el estrato indeseado. Fuente: Elaboración propia, 2021.
- Fig. 7** Intervención del hielo seco sobre el estrato indeseado. Proceso de sublimación. Fuente: Elaboración propia, 2021.
- Fig. 8** Intervención del hielo seco recubrimientos poliméricos. Fuente: Cold Jet, 2021.
- Fig. 9** Resultados del dry ice blasting. Fuente: Cold Jet, 2021.
- Fig. 10** Equipo BL 60. Producto de la empresa AQUILA Triventek®. Fuente: AQUILA Triventek, s.f..
- Fig. 11** Equipo PCS 60-AERO2®. Producto desarrollado por AERO2® y la empresa Cold Jet®. Fuente: Cold Jet, 2019.
- Fig. 12** Equipo SJ-10. Producto de la empresa Cryoclean®. Fuente: CRYOCLEAN, s.f.
- Fig. 13** Equipo SJ-25. Producto de la empresa Cryoclean®. Fuente: CRYOCLEAN, s.f.
- Fig. 14** Equipo PT COMBI. Producto de la empresa. Fuente: PolarTech, s.f.
- Fig. 15** Proyección de CO2 sobre una superficie esmaltada, sublimación del material tras chocar con el estrato a remover. Fuente: RM Contractors, 2020.
- Fig. 16** Pantalla de control del equipo AERO2 PCS 60. Valores ajustables del perfil: Presión del chorro, dimensiones del pellet y tasa de alimentación. Fuente: Cold Jet, 2019.
- Fig. 17** Boquilla recta y boquilla curva. Fuente: Cold Jet, 2019.
- Fig. 18** Boquilla cilíndrica y boquilla de abanico plano. Fuente: Cold Jet, 2019.
- Fig. 19** Boquilla de plástico y boquilla de metal refractario. Fuente: Cold Jet, 2019.
- Fig. 20** Boquillas de bajo caudal. Fuente: Cold Jet, 2019.
- Fig. 21** Boquillas de alto caudal. Fuente: Cold Jet, 2019.
- Fig. 22** Puerta del hangar de la aerolínea American Airways (Texas). Fuente: EverGreene, s.f.
- Fig. 23** Cascos militares orientales del Museo Colección Wallace de Londres. Fuente: Cutulle & Kim, 2015.
- Fig. 24** Bronze Form, Henry Moore, 1986. Fuente: Getty Iris, 2012.
- Fig. 25** Bronze Form, Henry Moore, 1986. Fuente: Getty Iris, 2012.
- Fig. 26** Model, Robert Morris, 1967. Fuente: Shockey, 2009.
- Fig. 27** Antes de la limpieza. Fuente: Shockey, 2009.
- Fig. 28** Después de la limpieza. Fuente: Shockey, 2009.
- Fig. 29** Untitled, Frederick Everesley, 1974. Fuente: Smithsonian American Art Museum, s.f.
- Fig. 30** Aplicación de la limpieza criogénica por un operador. Fuente: ICEsonic, 2021.