

**OBTENCIÓN DE ÁCIDO PERACÉTICO MEDIANTE UN MÉTODO
ALTERNATIVO BASADO EN BIO-BLANQUEO PARA LAVADO Y
DESINFECCIÓN DE PRENDAS HOSPITALARIAS**

ESTUDIANTES

**Valeria Tobar Acosta
Juan David Ortega**

**Director
Jhon Jairo Rios Acevedo**

**Universidad Santiago de Cali
Facultad de Ciencias Básicas
Programa de Química
Cali, Colombia
2025**

**OBTENCIÓN DE ÁCIDO PERACÉTICO MEDIANTE UN MÉTODO
ALTERNATIVO BASADO EN BIO-BLANQUEO PARA LAVADO Y
DESINFECCIÓN DE PRENDAS HOSPITALARIAS**

ESTUDIANTES
Valeria Tobar Acosta
Juan David Ortega

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título
de Químico**

Director
Jhon Jairo Rios Acevedo

Línea de Investigación:
Solución a problemas ambientales
Grupo de Investigación:
GIEMA

Universidad Santiago de Cali
Facultad de Ciencias Básicas
Programa de Química
Ciudad, Colombia
2025
IMPACTOS

Relacione el (los) impacto(s) que presentó el Trabajo de Grado

IMPACTO	PRODUCTO	BENEFICIARIO(S)
Económico	Tri es una materia prima con un costo menor frente al TAED.	Lavaclínicas S.A. por contar con sistemas alternos más ecológicos y eficientes
Responsabilidad social	Trabajadores que manipulan los insumos, quienes transportan las prendas, los pacientes que las utilizan y los profesionales de salud que tienen contacto directo.	Empleados, clientes y pacientes
Científico	Alternativas ecológicas en el blanqueo de prendas de uso hospitalario.	Empresa, tesisistas.
Indicadores de Gestión	Operación	Empresa, empleados
Tecnológico	Maquinaria utilizada para la investigación industrial, insumos de laboratorio.	Empresa, empleados, clientes, tesisistas.
Técnico	Método Alterno en caso de no encontrarse TAED disponible.	Empresa, clientes, pacientes.
Ambiental	Sistema sostenible o amigable con el medio ambiente	Flora, fauna, humanos.
Social	Seguridad ante transmisiones de enfermedades a pacientes y personal médico	Empresa, empleados, clientes, pacientes, tesisistas.
Cultural	Mejoramiento prácticas utilizadas en el área de trabajo y ambientes hospitalarios	Empresa, empleados, clientes, pacientes, tesisistas.

OBTENCIÓN DE ÁCIDO PERACÉTICO MEDIANTE UN MÉTODO ALTERNATIVO BASADO EN BIO-BLANQUEO PARA LAVADO Y DESINFECCIÓN DE PRENDAS HOSPITALARIAS

Estudiantes

Valeria Tobar Acosta, Juan David Ortega Borrero
CORREOS

valeria.tobar00@usc.edu.co, juan.ortega04@usc.edu.co

Grupo de Investigación GIEMA de la Universidad Santiago de Cali, Facultad de Ciencias Básicas
Campus Pampalinda Calle 5 # 62-00, Santiago de Cali, Colombia

RESUMEN

En este estudio se evaluó la disponibilidad de ácido peracético (APA) en presencia de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) dentro de un sistema alternativo de blanqueo y desinfección basado en triacetina (Tri) y H_2O_2 , catalizado por arilesterasa (Ar), para prendas de uso hospitalario (PUH) de la empresa Lavaclínicas S.A. La cuantificación del APA se realizó mediante la técnica permanganométrica/yodométrica en un sistema "in vitro" a escala de laboratorio. La investigación se desarrolló en dos escenarios tras confirmar la generación de APA mediante la acción enzimática de perhidrólisis. En el primer escenario, se determinó el intervalo de tiempo óptimo para la reacción, identificado entre los 10 y 15 minutos. En el segundo, se evaluó la eficacia del sistema alternativo en la remoción de manchas de PCA y ADN, en comparación con el sistema convencional (TAED/ H_2O_2), logrando una eliminación total del ADN y una remoción parcial del PCA.

Para optimizar la reacción enzimática en el primer escenario, se diseñaron diversos sistemas experimentales ajustando variables como cantidad de reactivos, pH, agentes caotrópicos y soluciones amoniacaes y de fosfatos, con el fin de hiperactivar la enzima Ar. Se encontró que la solución de fosfatos alcanzó una eficiencia máxima de aproximadamente 60 %. En el segundo escenario, las manchas fueron tratadas con y sin la adición de detergente (CON y SIN, respectivamente). Aunque el detergente desnatura parcialmente la enzima y afecta la generación de APA, mejora el blanqueo y facilita la eliminación de manchas difíciles, como las de PCA. Estas manchas, producidas por gluconato de clorhexidina e hipoclorito de sodio, son visualmente similares a las de ADN pero más complejas de remover en las PUH. El sistema alternativo mostró una eficiencia comparable al sistema actual. Por ello, se recomienda incorporar el detergente después del intervalo óptimo de la reacción para evitar interferencias en la generación de APA.

Palabras clave: Ácido Peracético, Gluconato de Clorexhidina, Peróxido de Hidrógeno, Blanqueo y Desinfección, Triacetina, Arilesterasa.

OBTAINING PERACETIC ACID THROUGH AN ALTERNATIVE METHOD BASED ON BIO-BLEACHING FOR WASHING AND DISINFECTION OF HOSPITAL GARMENTS

ABSTRACT

The availability of Peracetic Acid (APA) in the presence of Hydrogen Peroxide (H_2O_2) was evaluated within an alternative bleaching and disinfection system (Triacetin (Tri)/ H_2O_2 catalyzed by Arylesterase (Ar)) for hospital garments (PUH) of the company Lavaclínicas S.A. For the quantification of APA, the permanganometric/iodometric technique was used. The research was carried out in two scenarios after confirming the positive availability of APA through the action of an enzyme that performs the perhydrolysis reaction. The first scenario consisted of determining the time interval of highest reaction yield, identified between 10 and 15 minutes. The second evaluated the reduction of PCA and DNA stains compared to the currently used system (TAED/ H_2O_2), achieving partial removal of PCA and total removal of DNA. In the first scenario, several experimental systems were designed in which variables such as quantities, pH adjustments, chaotropic agents, and ammonia and phosphate solutions were adjusted to hyperactivate the Ar enzyme. The results indicated that the phosphate solution achieved a maximum efficiency of approximately 60%. In the

second scenario, stains were treated with and without the addition of detergent (WITH and WITHOUT, respectively). Although the detergent partially denatures the enzyme and affects the generation of APA, it facilitates bleaching and the removal of difficult-to-remove stains, such as PCA. The latter, produced by chlorhexidine gluconate and sodium hypochlorite, are visually similar to DNA but are significantly more difficult to remove than PUH. The alternative system demonstrated comparable efficiency to the current system. Therefore, it is recommended to add the detergent after the time interval of highest reaction efficiency to avoid interference with APA generation.

Keywords: Peracetic acid, chlorhexidine gluconate, hydrogen peroxide, bleaching and disinfection, triacetin, arylstearase.

1. INTRODUCCION

En el contexto de la salud, garantizar la seguridad de pacientes, personal médico y visitantes es una prioridad, especialmente en lo que respecta a la prevención de infecciones derivadas de procesos de desinfección inadecuados (Ndhaief et al., 2019). Un aspecto clave en este proceso es el tratamiento adecuado de PUH, ya que la ropa contaminada puede actuar como un vector de transmisión de enfermedades (Saltos, 2021).

En este sentido, Lavaclinicas S.A. ha desarrollado un proceso de blanqueo y desinfección (PBD) que emplea tecnologías innovadoras para asegurar la higiene y durabilidad de los textiles utilizados en entornos hospitalarios.

El PBD utiliza H_2O_2 y APA como agentes principales, además de los productos fabricados internamente como detergentes líquidos, en polvo y suavizantes, evitando el uso de hipoclorito de sodio (NaOCl), el cual, aunque es efectivo, puede deteriorar los tejidos de las PUH y generar compuestos organoclorados (Leri & Anthony, 2013) (Scarfiello et al., 2024) perjudiciales para el medio ambiente como lo son los trihalometanos (Chen et al., 2025) (Figura 1).

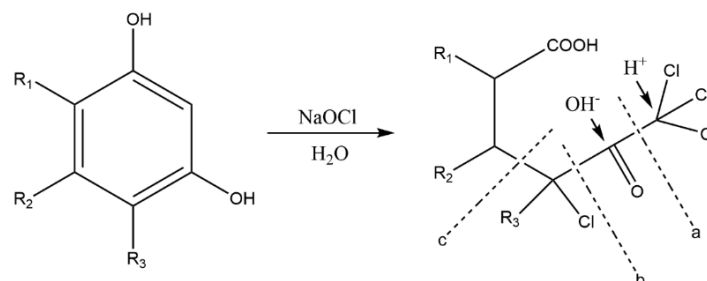


Figura 1. Mecanismo de formación de los Trihalometanos (THM) (Leri & Anthony, 2013)

El H_2O_2 y APA son compuestos que tienen la capacidad de eliminar una amplia gama de microorganismos, incluidos hongos, mohos, levaduras y bacterias (Gupta, V. K., & Suman, T. 2017) (Espinoza et al., 2018), sin el mismo nivel de daño que produce el hipoclorito. Dando uso de los anteriores posiciona a Lavaclinicas S.A. como un referente en prácticas sostenibles en el sector de lavandería cuidando el medio ambiente, lo cual puede atraer a un segmento de clientes más consciente del entorno en que vivimos y de la calidad de los servicios que reciben. Además, al asegurar la durabilidad de las prendas, la empresa puede ofrecer un valor añadido a sus clientes, fortaleciendo así su propuesta de servicio.

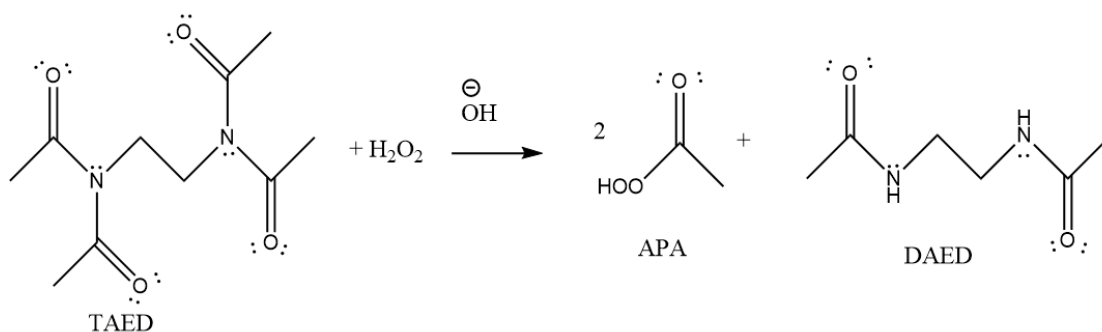
El APA ha sido utilizado popularmente en (Bavec, A., Knez. 2014):

- **Síntesis de perácidos para limpieza y blanqueo** (Abdel-Halim & Al-Deyab, 2011)
 - a. Se ha investigado su uso en la generación in situ de perácidos como el ácido peracético, que se emplea en detergentes y desinfectantes industriales.
 - b. Su estabilidad en presencia de peróxido de hidrógeno la hace ideal para su incorporación en formulaciones de blanqueo textil y de papel.
- **Epoxidación de aceites y compuestos insaturados** (Janković et al., 2020)

- a. Se ha utilizado en la síntesis de epóxidos a partir de aceites vegetales y compuestos orgánicos mediante la generación de perácidos, un proceso clave en la industria química sostenible.
- **Reacciones de oxidación selectiva** (Niu et al., 2024)
 - a. En la reacción de Baeyer-Villiger, la arilesterasa puede facilitar la conversión de cetonas en ésteres o lactonas mediante la generación de perácidos.
 - b. También se ha explorado su potencial en la oxidación selectiva de ciertos antibióticos, como la penicilina.
 - **Tratamiento de aguas residuales** (Ao et al., 2021)
 - a. Esterilizador tanto de aguas residuales, como de ambientes hospitalarios, farmacéuticos, cosméticos e industrias de alimentos.

El APA ha sido uno de los pocos oxidantes capaces de recuperar prendas de algodón que han sido dadas de baja en algunas clínicas debido a manchas de PCA. Estas manchas, caracterizadas por su difícil remoción y su apariencia similar a la del ADN, se forman en entornos hospitalarios cuando se intenta remover jabón con clorhexidina como componente activo, utilizando hipoclorito de sodio (Pérez, A., & Gómez, R. 2020). La clorhexidina es un agente desinfectante comúnmente utilizado en procedimientos quirúrgicos debido a su efectividad en la eliminación de microorganismos. Es aplicada en el área de intervención para garantizar un ambiente estéril durante las cirugías, ayudando a prevenir infecciones postoperatorias. (Barrett, S. P., & Hennessey, K. L. 2019)

No obstante, el método actual de producción de APA (ver Ecuación 1.) depende del Tetraacetilendiamina (TAED), un insumo con oferta limitada en Colombia, lo que representa un desafío logístico y operativo para la empresa.



Ecuación 1. Perhidrólisis del TAED con H₂O₂ en medio básico.

Ante esta problemática, el área de investigación y desarrollo, a través del presente estudio, buscó reducir la dependencia del activador TAED. Para ello, se llevó a cabo un exhaustivo rastreo bibliográfico donde identificó alternativas viables que permiten generar APA in situ mediante el uso de materias primas más accesibles en el comercio, que no representen un riesgo en su manipulación y que permitan tener una alternativa por si el TAED se torna más escaso.

La Tri se ha venido utilizado ampliamente en la producción de APA mediante una perhidrólisis para aplicaciones en el blanqueo de pulpa de madera (Echeverría et al., 2021) y desinfección de alimentos ovíparos (Vaddu et al., 2021), lo que la posiciona como una materia prima segura para el PBD. Con base en estos antecedentes, el presente estudio se enfoca en el desarrollo de una metodología alternativa que sea eficiente y menos agresiva para las prendas, empleando enzimas como catalizadores en la reacción de perhidrólisis entre la Tri y el H₂O₂.

La literatura científica documenta el uso de enzimas tipo esterases, que pertenecen a la familia de las hidrolasas, las cuales son capaces de catalizar reacciones de hidrólisis en compuestos de tipo ésteres o ácidos carboxílicos. Estas enzimas se utilizan frecuentemente como biocatalizadores en la fabricación industrial de productos farmacéuticos y detergentes (Johnson et al., 2024). Estas enzimas poseen un sitio activo, que corresponde a una región específica dentro de su estructura tridimensional donde se une el sustrato, la molécula sobre la cual ejerce su acción catalítica. Este sitio está constituido por un conjunto de residuos aminoácidos que crean un entorno químico óptimo para la facilitación de diversos tipos de reacciones bioquímicas que transforman al sustrato en el producto final (ver Figura 2.).

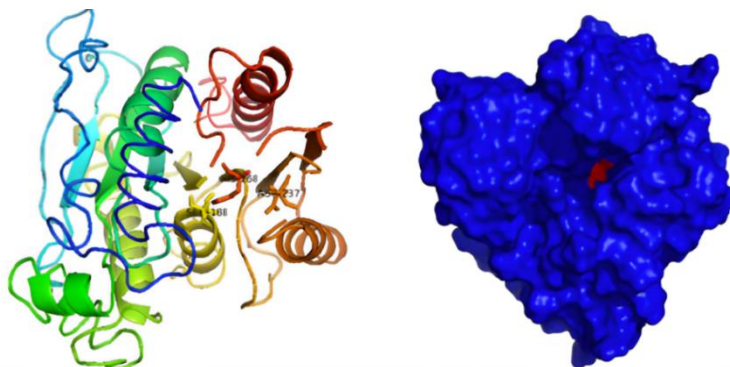


Figura 2. Esterasa (Triada catalítica serina, histidina y ácido aspártico) y (Superficie de la estructura y sitio activo)(Jiang et al., 2023)

En aplicaciones industriales, la hiperactivación enzimática puede ser muy útil, ya que mejora la eficiencia de los procesos. Por ejemplo, en la industria de detergentes las esterases son utilizadas para descomponer las grasas y aceites. La hiperactivación de estas enzimas permite un mejor rendimiento en la eliminación de manchas grasas de la ropa mediante reacciones de hidrólisis. (Navas González, 2019). Hoy en día las enzimas con aplicación detergente representan alrededor del 30% de la producción de enzimas total a nivel mundial y significan una de las aplicaciones más importantes y exitosas de la biotecnología moderna industrial (Chand & Mishra, 2003).

Recientemente en estudios científicos se han utilizado enzimas plegadas α/β -hidrolasa para catalizar reacciones que conllevan a la formación de perácidos como los es el APA, a partir de (Tri) con H_2O_2 . Sin embargo, las enzimas tienen la capacidad de catalizar múltiples reacciones químicas dentro de un mismo sitio activo, un fenómeno conocido como promiscuidad enzimática. Las hidrolasas tradicionalmente han sido conocidas por su función en la ruptura de enlaces éster y peptídicos mediante la incorporación de una molécula de agua (Sun & Syrén, 2025). No obstante, algunas de estas enzimas pueden utilizar peróxido de hidrógeno en lugar de agua, generando perácidos que pueden actuar como agentes oxidantes en diversas reacciones. (Vélez Rueda, J. O. 2020)

Considerando la información disponible, el estudio que se presenta se centra en la creación de una nueva metodología para la generación in situ de APA utilizando una enzima que catalice reacciones de perhidrolisis. Este enfoque propone sustituir el sistema convencional de TAED/ H_2O_2 por un sistema basado (Tri)(Ar) / H_2O_2

La clave de esta metodología radica en la modificación de la reacción de perhidrólisis de APA utilizada actualmente, donde depende del pH para su catalización a uno que utiliza la catálisis enzimática. Esto se justifica por las propiedades de la Tri, un éster que puede ser fácilmente procesado por enzimas específicas. Estas enzimas pueden romper enlaces en la Tri para liberar grupos acetilo, lo que a su vez permite la formación de APA, como se explica en esta investigación.

La catálisis enzimática permite tener un sistema alternativo para la generación de APA, lo cual, no solo haría eficiente el PBD, sino que sea necesario dejar de generar el perácido, sino una facilidad de manipulación de insumos y residuos no peligrosos para los trabajadores y pacientes de los ambientes hospitalarios. Además, ofrecería una alternativa más sostenible al proceso TAED/ H_2O_2 , reduciendo el uso de reactivos como el ácido cítrico y el metasilicato de sodio para ajustar el pH.

Con base en lo anterior, el objetivo principal de esta investigación fue determinar, de manera in vitro, las condiciones óptimas del sistema (Tri)(Ar)/ H_2O_2 catalizado enzimáticamente por Ar, como un sistema de bio-blanqueo (SBB) alternativo al actual sistema PBD TAED/ H_2O_2 . En el estudio, se evaluó la disponibilidad de APA y su porcentaje de rendimiento, optimizando los insumos. Asimismo, se analizó de forma visual la disminución de las manchas de ADN y PCA en PUH de algodón, comparándolo con el sistema de blanqueo actualmente utilizado.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Reactivos y Equipos

Para la realización de este trabajo, se utilizó yodato de potasio estándar volumétrico, material de referencia secundaria para yodometría trazable a NIST SRM (Merck Certipur®, 99,89% ± 0,09%), Oxalato de sodio estándar para volumetría ACS (PanReac AppliChem, 99,95 – 100,05%), tiosulfato de sodio anhidro (Merck EMPLURA®, 99,9%), permanganato de potasio (Mol labs Ltda., 99,5%), yoduro de potasio para análisis (EMSURE® Merck, 100,3%), ácido sulfúrico (Mol labs Ltda., 25%), almidón soluble (MAIZENA), Bactroderm® clorhexidina jabón 35 mL (3M Soluprep™^{MC}), hipoclorito de sodio 15% aprox. (Yilop de Colombia S.A.), Buffer para calibración de pH metro (Hanna instruments, pH 4,00, 7,00 y 10,00), detergente en polvo (Lavaclinicas S.A. fórmula bajo secreto comercial), desengrasante textil (Lavaclinicas S.A. fórmula bajo secreto comercial), peróxido de hidrógeno 50% (Quimtia S.A.S., 50,0 – 50,9%), Triacetina (BellChem International S.A.S. 95%-99%), PrimaGreen® EcoWhite 10 (Merquiand S.A.S.), telas en tejido plano genero 100% algodón.

Balanza analítica Mettler Toledo modelo AB204-S/FACT, pH metro Mettler Toledo modelo Seven easy S20, plancha de agitación y calentamiento Corning modelo PC-420, lavadoras extractora de cilindro dividido marca Milnor® modelo 42044SP2.

2.2. Método para determinar APA en presencia de H₂O₂

La determinación del APA se llevó a cabo utilizando la técnica permanganométrica/yodométrica (Cavallini et al., 2013). (B. DUDLEY SULLY * & P. L. WILLIAMS, 1962) Para cada ensayo, se tituló una muestra de 10,0 mL tomada del sistema, utilizando una solución de permanganato de potasio (KMnO₄) 0,025 M previamente estandarizada con oxalato de sodio estándar (Na₂C₂O₄). Este proceso se realizó en un medio ácido y a una temperatura controlada entre 0 y 5 °C. Posteriormente, se añadió una solución al 5% de yoduro de potasio (KI), que reaccionó con el APA presente, generando yodo (I₂) en medio ácido. El yodo producido se tituló con tiosulfato de sodio (Na₂S₂O₃) 0,01 M, previamente estandarizado con yodato de potasio estándar (KIO₃). Para indicar el punto final de la titulación, se empleó 1 mL de una suspensión de almidón al 5%. La acidificación se realizó con ácido sulfúrico al 25%. El procedimiento se encuentra documentado en el manual de análisis fisicoquímicos de la empresa bajo el título "A004-Determinación de ácido peracético en presencia de peróxido de hidrógeno". Este documento también incluye las disposiciones relacionadas con el manejo de residuos, cumpliendo con la normativa vigente en Colombia.

2.3. Evaluación la eficiencia del sistema de blanqueo alterno en Manchas (PCA y ADN).

Se empleó una mezcla en proporción 1:1 de jabón Soluprep™^{MC}, que contiene 2% de gluconato de clorhexidina y 2,5% de hipoclorito de sodio, la cual se identificará como PCA siendo la anterior la mancha de difícil remoción. En estos ensayos se siguió la misma metodología descrita en los apartados 2.2.1, con la diferencia de que se incorporó al vaso del sistema un fragmento de tela de algodón 100% o previamente manchado con una gota de PCA. La mancha fue sometida al sistema asegurando un intervalo mínimo de 20 horas desde su generación, la cual fue en trozos de la tela de algodón. También, se realizó manchas con ADN de porcino en las mismas condiciones que las de PCA.

Estas manchas fueron procesadas en el sistema utilizando las cantidades previamente establecidas, las cuales demostraron un porcentaje de rendimiento igual o superior al 50%, tanto CON como SIN ayudas del proceso.

3. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El objetivo principal fue encontrar un método para generar APA in situ, reduciendo costos y asegurando la durabilidad de las prendas a lo largo del tiempo. La perhidrólisis se presenta como una alternativa viable, ya que es un proceso ampliamente utilizado debido a su alta capacidad de oxidación, atribuida a la generación de radicales hidroxilos mediante la escisión homolítica de los enlaces O-O del APA (Huo et al., 2024).

Actualmente, la perhidrólisis se lleva a cabo mediante el sistema TAED/H₂O₂, en el cual un mol de TAED genera dos moles de APA (ver Figura 3).

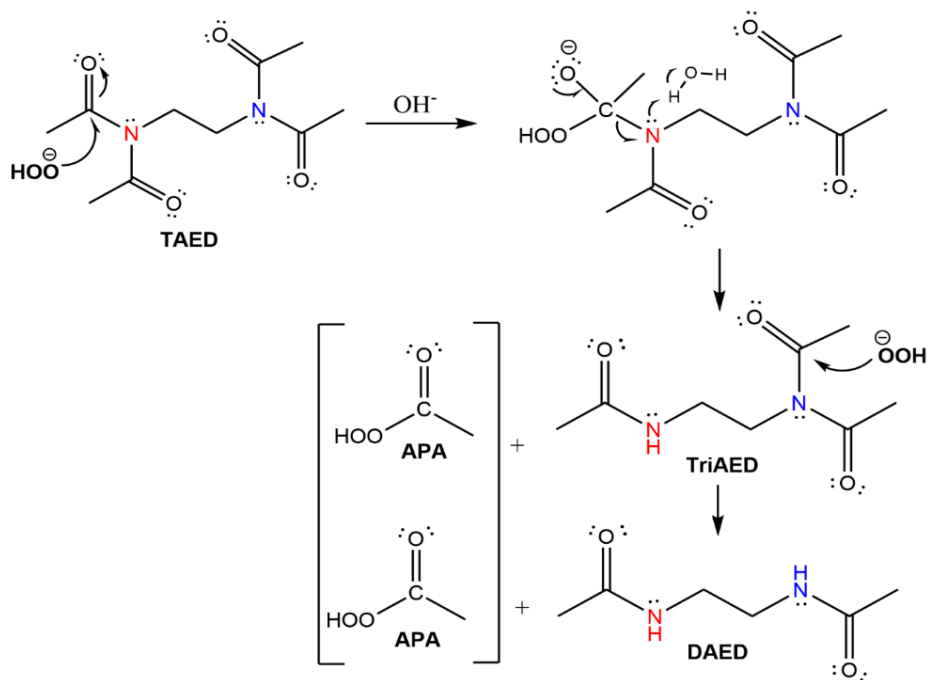
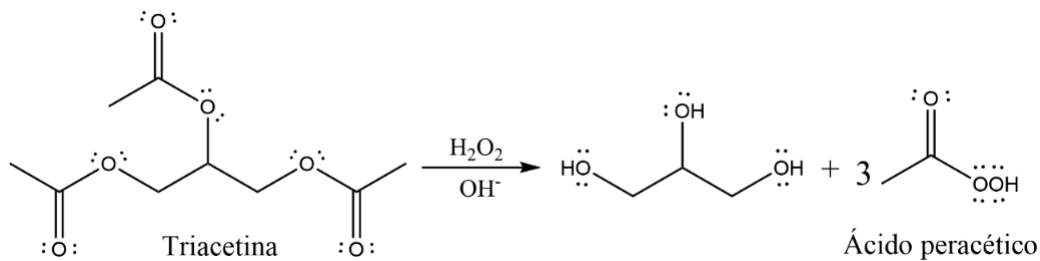


Figura 3. Mecanismo de reacción en medio básico del H_2O_2 con TAED para generar APA. (Torres J.C et al., 2022).

En la literatura se ha documentado el uso de compuestos tipo acetilo, como la triacetina (Tri), para sintetizar APA mediante una reacción con peróxido de hidrógeno en medio alcalino, lo que da lugar a una reacción de perhidrolisis (ver Ecuación 2.). (Ogata & Sawaki, 1967)



Ecuación 2. Perhidrolisis de la (Tri) en medio alcalino (Davies & Deary, 1991)

El proceso de perhidrólisis con Tri en un medio alcalino es análogo a la reacción utilizada en el sistema de formación de APA actual basado en el sistema TAED / H_2O_2 . En ambos casos, la reacción implica la escisión de un éster a través de la acción del peróxido de hidrógeno, un proceso mecánicamente similar a una hidrólisis, Sin embargo, la diferencia fundamental radica en que, en la perhidrólisis el peróxido de hidrógeno actúa como nucleófilo en lugar del agua. (ver Figura 4). (Davies & Deary, 1991)

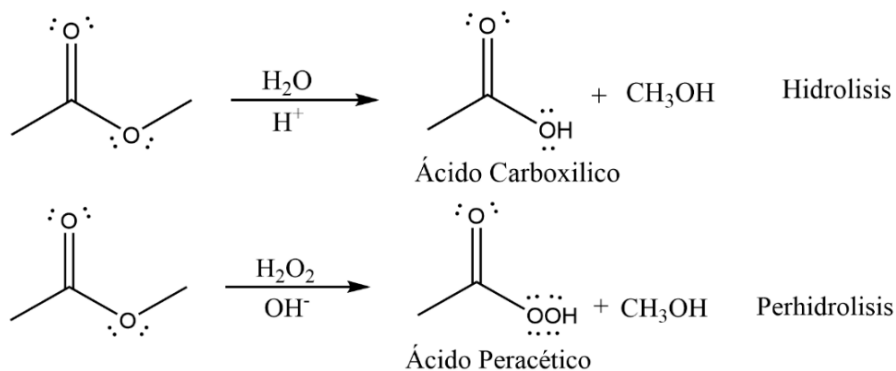


Figura 4. Reacción de hidrólisis y perhidrolisis (Davies & Deary, 1991)

La reacción mencionada requiere un pH altamente básico (12-13) para maximizar el rendimiento, lo que la hace inviable para el PBD de Lavaclinicas S.A.S. El uso repetido de NaOH, base fuerte corrosiva, acelera el deterioro de las prendas, reduciendo su durabilidad, y puede dejar residuos que induzcan dermatitis de contacto por alérgenos en los textiles (Sánchez et al., Armengol, 2022).

Tri, un triéster de glicerol, actúa como precursor de grupos acetilo y facilita la perhidrólisis al reaccionar con HOO^- , generando un mol de APA por grupo acetilo liberado (Enviro Tech Chemical Services Inc., 2018). Este estudio evalúa Tri como sustituto del TAED en la generación in situ de APA, destacando su accesibilidad y uso en diversos productos como alimentos, cosméticos y fármacos (Ponce & de Saad, 2020; Rodríguez & Gómez, 2021).

No obstante, la reacción con Tri y H_2O_2 es lenta, por lo que se exploró la catálisis enzimática con Lipasas, cuya triada catalítica (serina, histidina y ácido aspártico) polariza al sustrato y facilita su transformación química. Inhibidores o activadores pueden modular la actividad enzimática, alterando su funcionalidad (Manoel et al., 2015; Chen et al., Zhang et al., 2021).

Las enzimas pueden modificar su estructura y aumentar su actividad mediante modificaciones postraduccionales como fosforilación, acetilación o metilación, que inducen un cambio conformacional en su estructura tridimensional favoreciendo la interacción con los sustratos (Melo et al., Cuamatzi, 2021), este tipo de activación puede ser producida mediante el uso de líquidos iónicos como los son soluciones a base de fosfatos, amonios cuaternarios entre otros (Plou, et al., 2023)

La actividad enzimática puede ser potenciada por cofactores como iones metálicos o moléculas orgánicas, optimizando el sitio activo (Yukl & Davidson, 2018). Mutaciones en residuos clave, como la serina en esterasas, incrementan la velocidad de reacción (Lee et al., 2021). Factores como pH y temperatura óptimos también inducen hiperactivación sin desnaturalización (Nelson, Cox, & Lehninger, 2017).

La escisión del sustrato comienza cuando los lípidos (Tri) se unen al centro activo de la enzima, cuya triada catalítica incluye serina, histidina y ácido aspártico (Arrieta-Fonseca, M., 2024). El ácido aspártico polariza el imidazol de la histidina, facilitando ataques nucleofílicos de la serina y el H_2O_2 sobre el carbonilo del sustrato (Tri), formando intermediarios tetraédricos (IT1 e IT2), que luego se descomponen para liberar APA (Álvarez Torrado, 2019). (ver Figura 5).

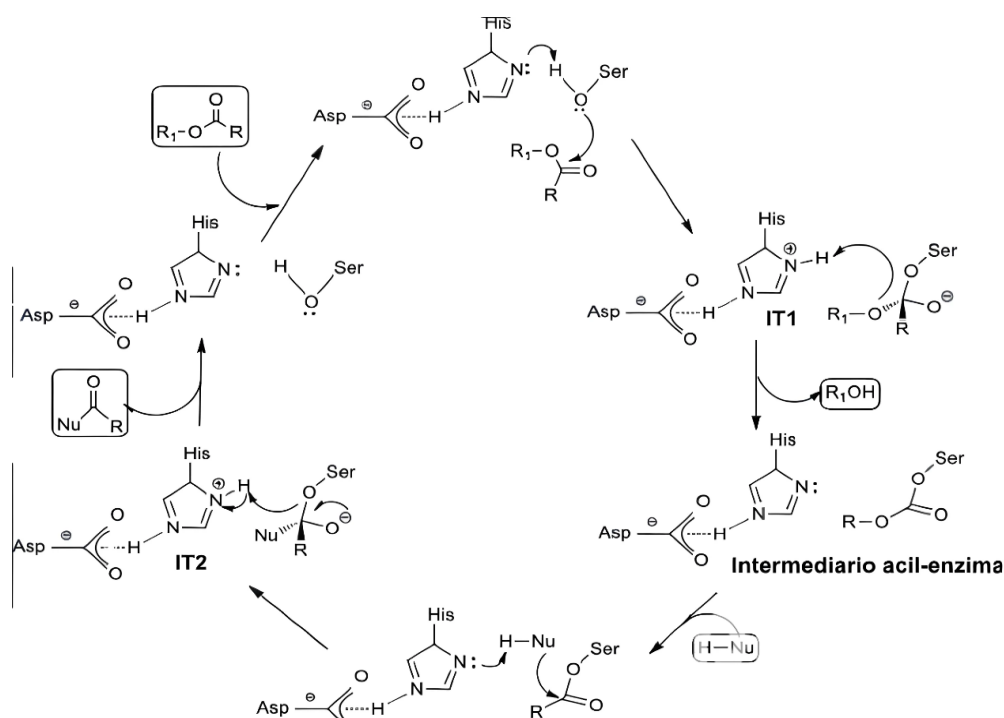


Figura 5. Mecanismo catalítico de las hidrolasas (Álvarez Torrado, 2019).

Estas enzimas que se pliegan con actividad de perhidrolisis se denominan colectivamente perhidrolasas teniendo como sustratos compuestos acetilados tipo éster o ácido carboxílico como la Tri para obtener como producto el ácido peracético. (Jia et al., 2021).

Ar es una enzima perteneciente a la familia de las serinas hidrolasas. Su función principal es la hidrólisis de ésteres aromáticos, especialmente los derivados de ácido paraoxon y fenilacetato. Sin embargo, estudios recientes han demostrado que también puede catalizar la perhidrólisis en presencia de peróxido de hidrógeno (Carboni-Oerlemans et al., 2006), lo que la convierte en un ejemplo de promiscuidad catalítica similar a lo que se observó en la Figura 4, pero utilizando Ar. (Vélez Rueda, J. O. 2020)

El método alternativo para obtener APA se diseñó en un medio con un pH neutro, con el fin de evitar el uso de agentes básicos que, al reaccionar con el H_2O_2 , podrían representar un riesgo durante su manipulación. Para ello, se optó por trabajar con enzimas del tipo arilesterasas (Ar), pertenecientes a la familia de las hidrolasas, con el objetivo de reducir la dependencia del TAED, simplificar el proceso, facilitar la manipulación de insumos y mantener o disminuir los costos, sin comprometer la calidad y durabilidad de las prendas. Además, el uso de estas enzimas acelera la cinética de la reacción de perhidrólisis, utilizando el H_2O_2 como nucleófilo para la formación de perácidos (Carboni-Oerlemans et al., 2006) (Figura 6).

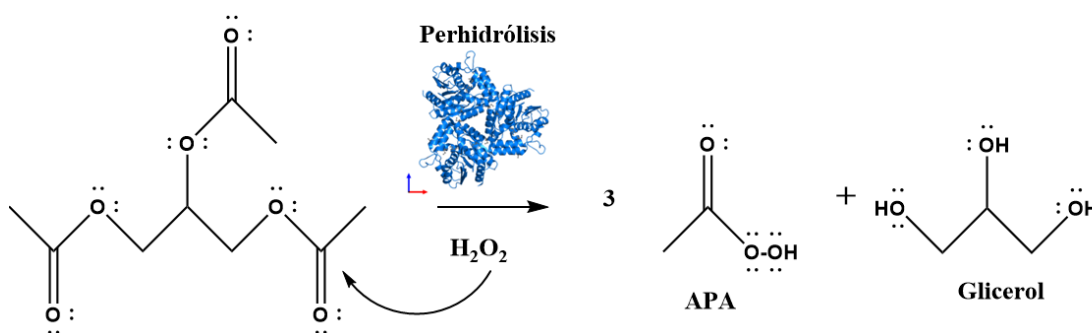


Figura 6. Perhidrólisis de la triacetina catalizado por la arilestearasa.

En este escenario, dicho procedimiento permite alcanzar conversiones de hasta el 97%, dependiendo de la cantidad inicial de H_2O_2 , aplicando un exceso del 50% de Tri, para desplazar el equilibrio de la reacción hacia los productos, logrando rendimientos elevados de APA con una relación molar de Tri: H_2O_2 de 1,5:1 (Echeverría et al., 2021)

Tri es una materia prima que, como se mencionó previamente, es segura para el medio ambiente, económica y de fácil manipulación. De manera similar, Ar, cuando es activada de manera intensiva, cataliza la perhidrólisis de la Tri para formar perácido en un primer paso, utilizando el H_2O_2 como sustrato para la oxidación (Carboni-Oerlemans et al., 2006). Este proceso permite obtener tres moles de APA según la estequiometría de la Tri (ver Figura 7), lo que conlleva una reducción en el uso de materias primas y una alta probabilidad de alcanzar el rendimiento de reacción deseado. Con base en estos factores, se propuso un sistema basado en H_2O_2 , Tri y Ar para la generación de APA.

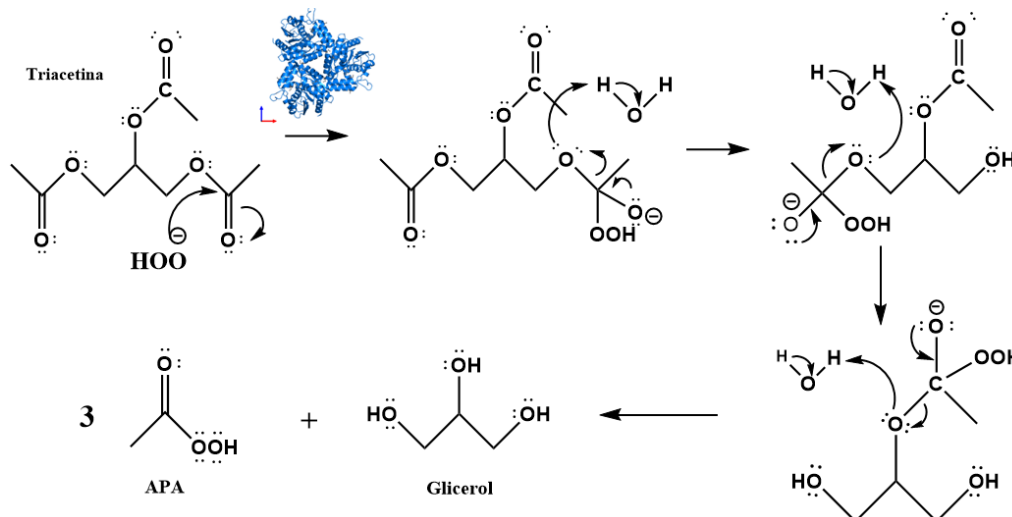


Figura 7. Mecanismo de reacción de generación de APA mediante Tri/Ar y H₂O₂ en el paso de blanqueo.

En primer lugar, se evaluó la disponibilidad de ácido peracético (APA) en un sistema de 100 mL a escala de laboratorio, con condiciones similares a las del sistema de 350 L utilizado a nivel industrial en Lavaclínicas S.A. El experimento se llevó a cabo utilizando Tri, Ar y H₂O₂. En cada prueba, se tomaron alícuotas a los tres minutos de iniciada la mezcla de las tres materias primas, luego a los cinco minutos y, posteriormente, cada cinco minutos durante un período de 60 minutos. Los resultados fueron positivos, ya que se logró cuantificar APA con un rendimiento que osciló entre el 15 % y el 86 %, dependiendo de las proporciones de Tri y Ar empleadas (ver Figura 8 (a)). La generación de APA depende, en primera instancia, de la cantidad de enzima utilizada, la cual fue considerable en esta fase inicial del estudio. No obstante, las pruebas no mostraron reproducibilidad en el tiempo, lo que sugiere la necesidad de optimizar las condiciones del proceso (ver Figura 8(b)). (Li et al., 2022)

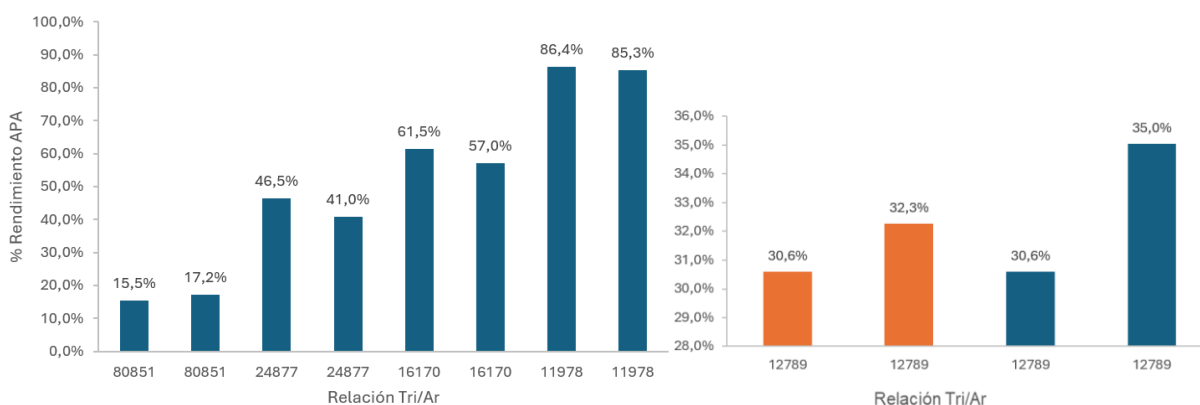


Figura 8. (a) Rendimiento de APA en función de relación Tri/Ar. (b) Misma relación de Tri/Ar, no reproducible en el tiempo.

La producción y el rendimiento de APA se evaluaron a lo largo del tiempo en sistemas con pH básico, neutro y ácido. Los resultados indicaron que la variación del pH no favoreció la generación de APA como se esperaba. Sin embargo, se observó un mayor rendimiento en condiciones básicas en comparación con un medio ácido, como se evidenció en las pruebas realizadas con las mismas proporciones de Tri/Ar, pero a diferentes niveles de pH (ver Figura 9).

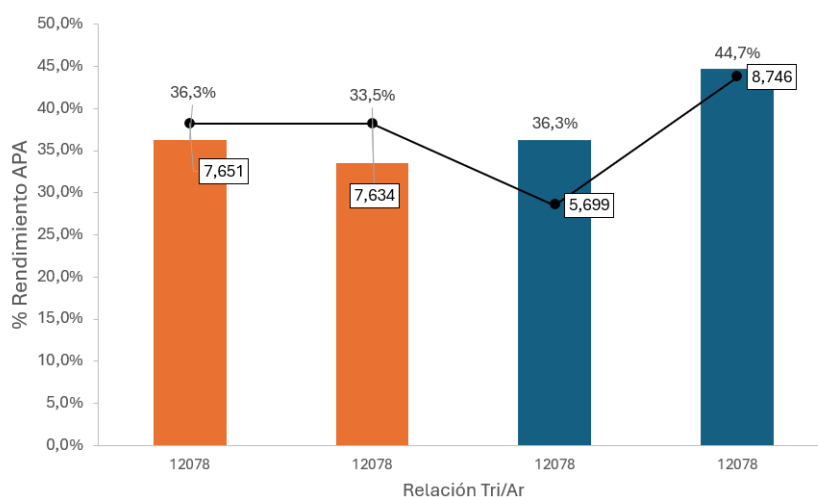


Figura 9. Comparación del comportamiento de pH del sistema donde se genera APA con misma relación Tri/Ar pero distintos pH.

La estabilidad del pH en ambos sistemas fue temporal, ya que, después de un corto período de tiempo, se observó una variabilidad significativa. En el medio ácido, el pH aumentó hasta 6 y luego volvió a disminuir, mientras que en el medio básico descendió hasta 7. En ambos casos, se evidenció la descomposición del APA (ver Figura 10). El rendimiento máximo alcanzado fue del 45 % después de 15 minutos. Dado que este valor no es óptimo para el proceso, se continuó investigando estrategias para hiperactivar la enzima Ar y así generar el perácido en la concentración esperada.

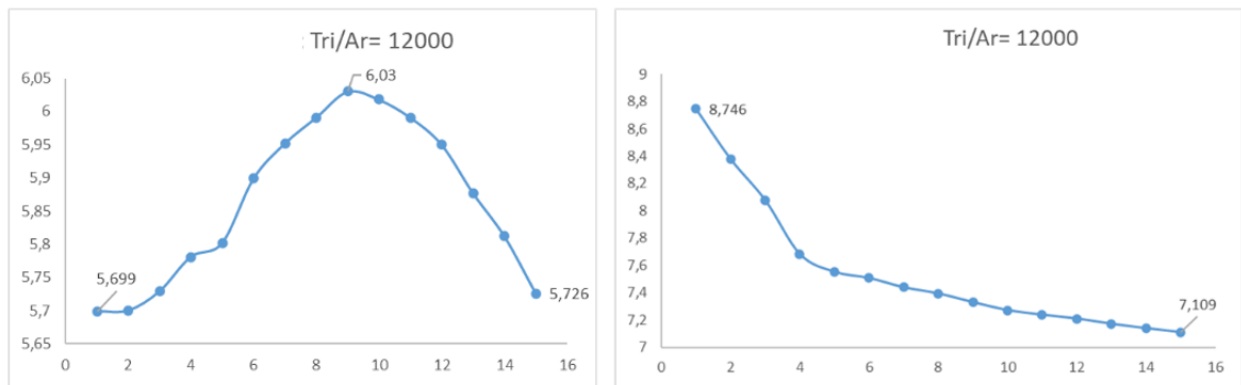


Figura 10. Comparación del comportamiento de pH del sistema donde se genera APA misma relación Tri/Ar en pH ácido y pH básico.

Los altos rendimientos se deben a las grandes cantidades de Ar y Tri utilizadas. La investigación busca optimizar el proceso, empleando cantidades mínimas para lograr desinfección y blanqueo. Se exploró la hiperactivación enzimática para aumentar la generación de iones perhidróxilo sobre hidróxilo. Aunque un exceso de H_2O_2 favorece la perhidrólisis (Carboni-Oerlemans et al., 2006), también se genera glicerol y ácido acético por hidrólisis (Davies & Deary, 1991), que no reaccionan con el radical hidroxilo para formar perácido. Por ello, se necesita un agente que hiperactive la enzima, facilitando la reacción con estos subproductos. (ver Figura 11).

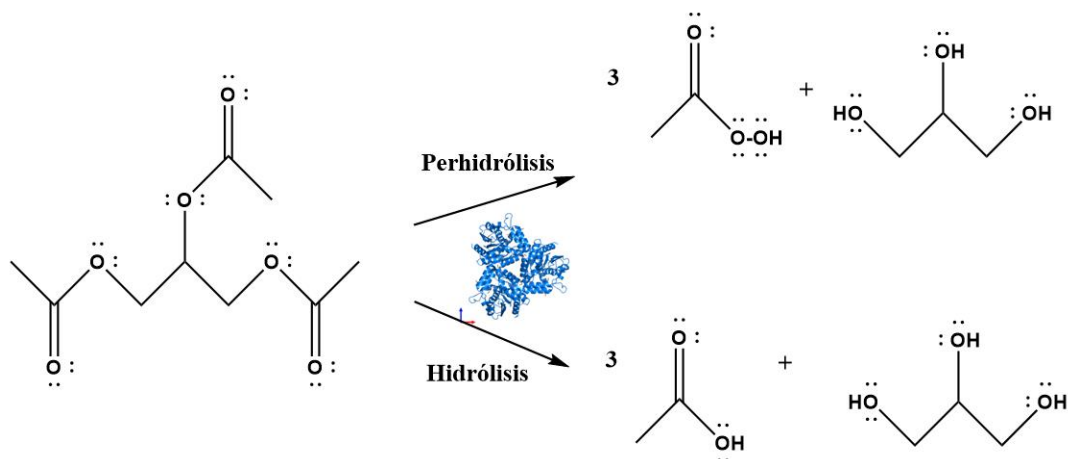


Figura 11. Reacciones simultáneas de perhidrólisis e hidrólisis que se dan con enzima Ar.

En los ensayos siguientes, se utilizó un tensioactivo aniónico, lo que resultó en una reducción del rendimiento de la reacción. Esto sugiere que las ayudas de proceso (AP) pueden influir en la generación de APA provocando una desnaturalización por sus componentes (Martin del Campo et al., 2023). También se evaluó el tiempo de reacción para determinar su impacto en el rendimiento; sin embargo, con la relación Tri/Ar utilizada, no se observó un aumento significativo.

Para mejorar la disponibilidad de APA, se incorporó un agente caotrópico. No obstante, la perhidrólisis no aumentó como se esperaba; por el contrario, la concentración del analito generado disminuyó en un 10 %. Este efecto se debe a que los agentes caotrópicos desorganizan los puentes de hidrógeno en el medio acuoso, aumentando la entropía del sistema y debilitando las interacciones no covalentes. Como resultado, se produce la desnaturalización y solubilización de la enzima (Martin del Campo et al., 2023).

Ante esta situación, se buscó un agente que desbloqueara el sitio activo de Ar, permitiendo la interacción eficiente con el sustrato para optimizar la reacción. Para ello, se evaluaron una solución amoniacal y una solución de fosfatos con el objetivo de estabilizar el sistema y reducir la hidrofobicidad de Ar, facilitando su actividad enzimática. Se observó un incremento del rendimiento en aproximadamente un 20 % al añadir el

buffer amoniacal. Sin embargo, con la solución de fosfatos se obtuvo el mismo aumento con una menor proporción de H_2O_2 , logrando un rendimiento de reacción del 95 % en solo 5 minutos. Por esta razón, se seleccionó la solución de fosfatos, ya que regula la fosforilación de Ar, promoviendo su reestructuración e hiperactivación (He et al., 2025).

El siguiente paso consistió en ajustar las relaciones molares de las materias primas y reactivos para optimizar la eficiencia del sistema en el PBD (Li et al., 2022). Esto incluyó la determinación del tiempo en el que se alcanza el máximo rendimiento de reacción sin afectar los tiempos de blanqueo del lavado. Para ello, se replicó el sistema utilizando las mismas relaciones iniciales de Tri/Ar. Sin embargo, estas relaciones eran elevadas, por lo que se buscó reducir costos en insumos y minimizar el impacto ambiental de los residuos generados.

Se observó que la disminución en las proporciones de Tri/Ar afectaba directamente el porcentaje de rendimiento de APA (Li et al., 2022). En una primera fase, moderando las cantidades y excluyendo la solución de fosfatos, el rendimiento máximo alcanzado fue del 27 % a los 10 minutos. Posteriormente, se evaluó el efecto del exceso de H_2O_2 , cuyos resultados se presentan en la Figura 12. Finalmente, al variar las cantidades de Tri y la solución de fosfatos, se evidenció que el rendimiento no se veía afectado significativamente, alcanzando aproximadamente un 60 % a los 20 minutos.

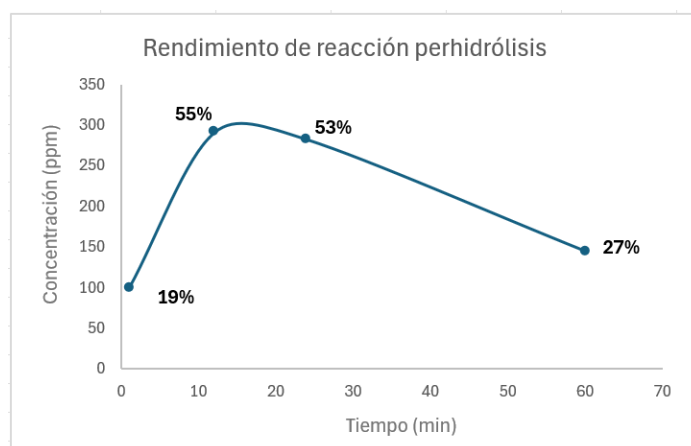


Figura 12. Rendimiento de reacción variando el peróxido y permaneciendo relaciones de Tri/Ar y solución de fosfatos.

Se ejecutaron nuevamente los sistemas hasta que se redujo al mínimo la cantidad de solución de fosfatos y de Tri, logrando rendimientos aproximados al 60% en 10 minutos (ver Figura 13). También se visualizó que la solución de Ar preparada para el sistema era más eficiente cuando se utilizaba fresca.

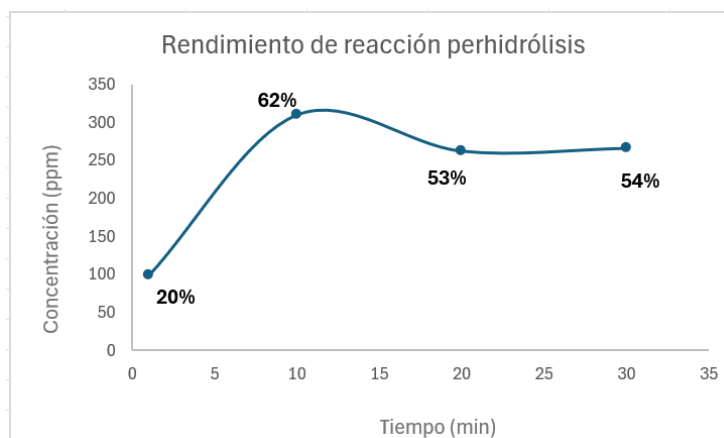


Figura 13. Rendimiento de reacción permaneciendo exceso de H_2O_2 y disminuyendo relaciones de Tri/Ar y solución de fosfatos.

A continuación, se evaluó el efecto del desengrasante en el sistema para determinar su impacto en el rendimiento de la perhidrólisis. Se observó que influye en la generación de APA durante los primeros 10

minutos; sin embargo, el rendimiento de la reacción alcanza aproximadamente un 60 % con un tiempo de reacción prolongado. A pesar de esta variación, el porcentaje de rendimiento esperado en esta investigación (50 %) no se ve afectado (ver Figura 14).

La reproducibilidad del sistema resulta difícil de evaluar debido a las pequeñas cantidades de materias primas y reactivos utilizadas, lo que genera variaciones significativas en los pesos medidos. No obstante, la desviación estándar relativa de las mediciones no superó el 5 %, lo que indica que el sistema puede reproducirse de manera consistente.

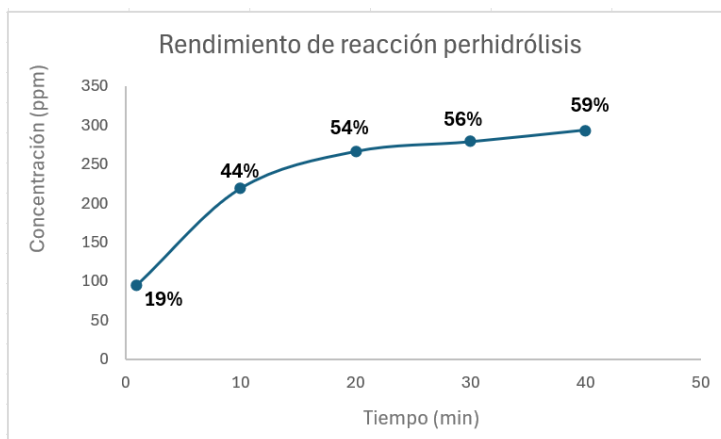


Figura 14. Rendimiento de reacción añadiendo desengrasante al sistema sin cambiar cantidades de MP y solución de fosfatos.

Otro método empleado para evaluar la presencia del APA fue mediante la medición del pH a lo largo del tiempo en el sistema. Se observó que, a medida que incrementaba el porcentaje de rendimiento del APA, el pH disminuía progresivamente. Inicialmente, el pH era de 6,4 y al final del proceso alcanzó un valor de 3,9 (ver Figura 15).

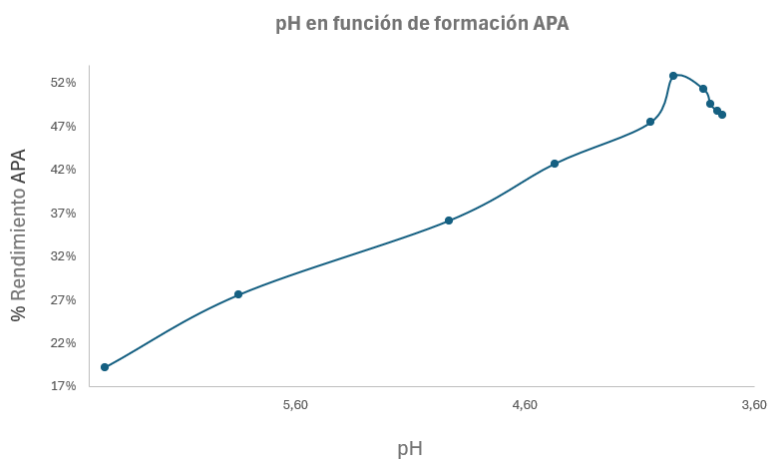


Figura 15. Verificación de pH del APA en su formación.

Finalmente, se evaluó la eficacia del sistema en la eliminación de manchas de sangre (ADN) y p-cloroanilina (PCA), esta última considerada de difícil remoción en entornos hospitalarios. Se realizaron pruebas con y sin la adición de detergente, el cual posee características caotrópicas que pueden provocar la desnaturalización de la enzima Ar. Adicionalmente, se midió el impacto del detergente en la concentración de APA en ambos sistemas (ver Figura 16).

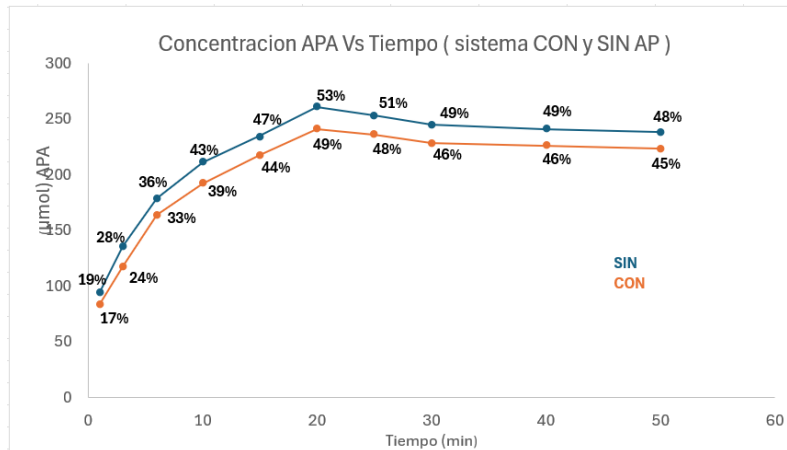
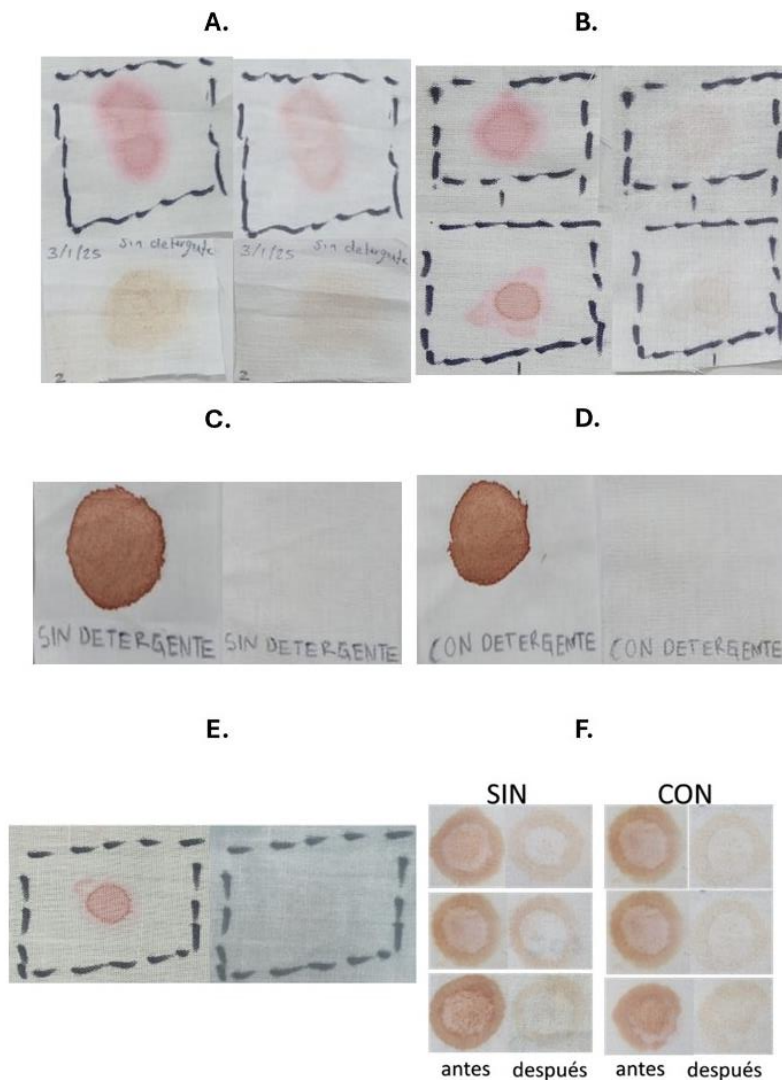


Figura 16. Rendimiento de reacción SIN y CON AP al sistema de blanqueo de manchas.

Por lo tanto, se recomienda añadir las AP diez minutos después de iniciar el sistema de blanqueo para no interferir con la generación de APA. A partir de este momento, el proceso debe enfocarse en la eliminación de manchas, mostrando una eficacia comparable al sistema TAED/H₂O₂ (Figura 17 E y F). En la Figura 17 (A y C), en ausencia de AP y detergente, la eliminación de manchas difíciles es menos efectiva. En cambio, el uso combinado de AP y detergente resulta altamente recomendable, logrando una mayor efectividad. En particular, las manchas de ADN son las primeras en eliminarse con el sistema de blanqueo propuesto (ver Figura 17 B, D).



En el sistema TAED/H₂O₂, la materia prima TAED presenta un costo significativamente elevado. En comparación, el sistema Tri/Ar en presencia de H₂O₂ no muestra una diferencia de costos considerable, ya que Ar, al ser una enzima, requiere cantidades mínimas, lo que hace que su impacto en el costo sea insignificante. Además, Tri es una materia prima de fácil acceso tanto en términos económicos como de disponibilidad.

Si bien el costo total de Tri y Ar es similar al del TAED, este último solo se puede adquirir bajo pedido y a través de un único proveedor, lo que representa una limitación operativa. En contraste, Tri y Ar están disponibles sin necesidad de pedidos anticipados, lo que garantiza un suministro continuo. Por lo tanto, en caso de no disponer de TAED, la generación de APA in situ no se vería afectada, permitiendo que el proceso en Lavaclínicas S.A. continúe sin interrupciones gracias al sistema alternativo.

4. CONCLUSIONES

La disponibilidad de ácido peracético (APA) en el sistema Tri/Ar en presencia de H₂O₂ fue determinada mediante ensayos in vitro, diseñados para simular el funcionamiento de una lavadora industrial. El estudio identificó las cantidades óptimas de reactivos y el tiempo de máximo rendimiento de la reacción, alcanzado entre los 10 y 15 minutos. Para acelerar el proceso, se empleó una solución de fosfatos que reestructura Ar, mejorando la eficiencia. Cabe destacar que la reacción genera APA sin requerir ajuste de pH.

Se determinó que, en la etapa inicial, el sistema debe estar libre de ayudas de proceso (AP), ya que interfieren en la generación de APA. Solo deben incluirse Tri, Ar y H₂O₂ hasta completar la reacción principal. El efecto de blanqueo fue evaluado utilizando manchas de PCA y ADN sobre tela de algodón 100%, mostrando mejores resultados con la adición de AP después de los 10-15 minutos iniciales.

Este sistema evita el manejo de sustancias que puedan reaccionar con H₂O₂ presentando una peligrosidad para quienes lo manipulan.

Este sistema alternativo no presenta diferencias significativas de costos frente al sistema TAED/H₂O₂. Sin embargo, en ausencia de TAED, el sistema propuesto asegura la generación de APA in situ, manteniendo la viabilidad operativa.

AGRADECIMIENTOS

A la empresa Lavaclínicas S.A. y a su Gerente, el Ingeniero Julio César Pérez, por su invaluable apoyo y compromiso con la investigación química. A los Aprendices SENA, Juan Esteban Mosquera y Juan Camilo Quiñones, quienes participaron activamente en la realización de los ensayos, y a Juan Carlos Torres, pionero en esta investigación, cuya orientación fue fundamental para su culminación. Al programa de Química y al Grupo de Investigación GIEMA, en la línea de investigación “solución a problemas ambientales”, y especialmente al profesor Jhon Jairo Ríos, por su dedicación tanto en el fortalecimiento académico como en la formación del carácter, contribuyendo al logro de esta investigación.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel-Halim, E. S., & Al-Deyab, S. S. (2011). Low temperature bleaching of cotton cellulose using peracetic acid. *Carbohydrate Polymers*, 86(2), 988–994. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.05.051>
- Álvarez Torrado, J. D. (2019). Biotransformación de la triacetina en 1,2-diacetina mediante reacciones de hidrólisis/metanolisis haciendo uso de lipasas inmovilizadas [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander].
- Ao, X., Eloranta, J., Huang, C.-H., Santoro, D., Sun, W., Lu, Z., & Li, C. (2021). Peracetic acid-based advanced oxidation processes for decontamination and disinfection of water: A review. *Water Research*, 188, 116479. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116479>
- Arrieta-Fonseca, M. (2024). Estado actual de las cutinasas en la problemática de la degradación de plásticos de un solo uso. *Revista Tecnología En Marcha*, 37(9), Pág. 94–102.

- Asociación Española de Bioempresas (ASEBIO). (2023). Situación Actual de la Biocatálisis y Perspectivas Futuras. Recuperado de <https://sebiot.org/wp-content/uploads/2023/05/Resúmenes-de-ponencias-sobre-Biocatálisis-Aplicada.pdf>
- Barrett, S. P., & Hennessey, K. L. (2019). Clorhexidina en la prevención de infecciones postquirúrgicas en procedimientos mayores: Eficacia y protocolos. *Revista de Enfermería y Salud*, 32(4), 275-283.
- Bavec, A., Knez, D., Makovec, T., Stojan, J., Gobec, S., & Goličnik, M. (2014). Exploring the aryl esterase catalysis of paraoxonase-1 through solvent kinetic isotope effects and phosphonate-based isosteric analogues of the tetrahedral reaction intermediate. *Biochimie*, 106, 184-186
- Brockman, H. L. (2004). Lipases. *Encyclopedia of Biological Chemistry*, 571–575. <https://doi.org/10.1016/B0-12-443710-9/00359-8>
- Carboni-Oerlemans, C., Domínguez de María, P., Tuin, B., Bargeman, G., van der Meer, A., & van Gemert, R. (2006). Hydrolase-catalysed synthesis of peroxy-carboxylic acids: Biocatalytic promiscuity for practical applications. *Journal of Biotechnology*, 126(2), 140–151
- Cavallini, G. S., Campos, S. X. de, Souza, J. B. de, & Vidal, C. M. de S. (2013). Comparison of methodologies for determination of residual peracetic acid in wastewater disinfection. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 93(8), 906–918. <https://doi.org/10.1080/03067319.2012.702274>
- Chand, P., & Mishra, R. K. (2003). El papel de las enzimas en los detergentes. *Ingeniería Química*. Recuperado de <https://www.ingenieriaquimica.net/articulos/299-el-papel-de-las-enzimas-en-los-detergentes>
- Chen, C., Yang, F., Wu, Q., Yu, J., Xie, J., Fang, Y., & Lin, T. (2025). Ocean as source or sink for legacy persistent organic pollutants. *Journal of Hazardous Materials*, 486, 136987. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136987>
- Chen, J., & Zhang, Y. (2021). Advances in enzyme engineering: Applications in biotechnology and medicine. *Biotechnology Advances*, 39, 107-123.
- Davies, D. M., & Deary, M. E. (1991). Kinetics of the hydrolysis and perhydrolysis of tetraacetylenediamine, a peroxide bleach activator. *Journal of the Chemical Society, Perkin Transactions 2*, 10, 1549–1552. <https://doi.org/10.1039/P29910001549>
- De, S., Peracético, Á., De, A. P., De, P., Luis, O., Espinoza, V., & Espinoza, M. (2018). UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO.
- DUDLEY SULLY *, & P. L. WILLIAMS. (1962, August). Sci-Hub | The analysis of solutions of per-acids and hydrogen peroxide. *Analyst*, 87(1037), 653 | 10.1039/AN9628700653. <https://sci-hub.se/10.1039/AN9628700653> Brockman, H. L. (2004).
- Echeverría, D., Venditti, R., Jameel, H., & Yao, Y. (2021). A general Life Cycle Assessment framework for sustainable bleaching: A case study of peracetic acid bleaching of wood pulp. *Journal of Cleaner Production*, 290. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125854>
- Enviro Tech Chemical Services Inc. (2018). Método para la generación de ácido peracético in situ en el punto de uso. (Patente No. ES 2 (Patente nº ES 2 682 675 T3). Oficina Española de Patentes y Marcas.
- Gupta, V. K., & Suman, T. (2017). Use of peracetic acid and hydrogen peroxide as disinfectants in healthcare settings. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 50(2), 120-125.
- He, Q., Wang, Z., Wang, R., Lu, T., Chen, Y., & Lu, S. (2025). Modulating the phosphorylation status of target proteins through bifunctional molecules. *Drug Discovery Today*, 30(2), 104307. <https://doi.org/10.1016/J.DRUDIS.2025.104307>

- Huo, X., Yi, H., Ma, D., Xu, F., Yan, H., Tang, L., Zeng, G., & Lai, C. (2024). Reactive complexes mediated singlet oxygen production by MnO₂ catalyzed peracetic acid: Characterization and DFT study. *Chemical Engineering Journal*, 497, 154571. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2024.154571>
- Janković, M. R., Govedarica, O. M., & Sinadinović-Fišer, S. V. (2020). The epoxidation of linseed oil with in situ formed peracetic acid: A model with included influence of the oil fatty acid composition. *Industrial Crops and Products*, 143, 111881. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2019.111881>
- Jia, W., Li, H., Wang, Q., Zheng, K., Lin, H., Li, X., Huang, J., Xu, L., Dong, W., & Shu, Z. (2021). Screening of perhydrolases to optimize glucose oxidase-perhydrolase-in situ chemical oxidation cascade reaction system and its application in melanin decolorization. *Journal of Biotechnology*, 328, 106–114.
- Jiang, W., Wijerathne, T. D., Zhang, H., Lin, Y. C., Jo, S., Im, W., Lacroix, J. J., & Luo, Y. L. (2023). Structural and thermodynamic framework for PIEZO1 modulation by small molecules. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 120(50). <https://doi.org/10.1073/PNAS.2310933120>
- Johnson, R. J., Chezem, C., Kersey, J., & Hoops, G. (2024). Abstract 1297 Combined rational and combinatorial refinement of the substrate specificity and enzyme reactivity of a biocatalytic esterase. *Journal of Biological Chemistry*, 300(3), 106159.
- Lee, H. Y., Cho, D. Y., Ahmad, I., Patel, H. M., Kim, M. J., Jung, J. G., Jeong, E. H., Haque, M. A., & Cho, K. M. (2021). Mining of a novel esterase (est3S) gene from a cow rumen metagenomic library with organophosphorus insecticides degrading capability: Catalytic insights by site-directed mutations, docking, and molecular dynamic simulations. *International Journal of Biological Macromolecules*.
- Leri, A. C., & Anthony, L. N. (2013). Formation of organochlorine by-products in bleached laundry. *Chemosphere*, 90(6), 2041-2049. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.10.088>
- Li, Y., Dong, H., Xiao, J., Li, L., Chu, D., Hou, X., Xiang, S., & Dong, Q. (2022). Insights into a novel CuS/percarbonate/tetraacetylenediamine process for sulfamethazine degradation in alkaline medium. *Journal of Hazardous Materials*, 435, 128999. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2022.128999>
- Manoel, E. A., Ribeiro, M. F. P., Dos Santos, J. C. S., Coelho, M. A. Z., Simas, A. B. C., Fernandez-Lafuente, R., & Freire, D. M. G. (2015). Accurel MP 1000 as a support for the immobilization of lipase from *Burkholderia cepacia*: Application to the kinetic resolution of myo-inositol derivatives. *Process Biochemistry*, 50(10), 1557–1564. <https://doi.org/10.1016/J.PROCBIO.2015.06.023>
- Martin del Campo, M., Gómez-Secundino, O., Camacho-Ruiz, R. M., Mateos Díaz, J. C., Müller-Santos, M., & Rodríguez, J. A. (2023). Effects of kosmotropic, chaotropic, and neutral salts on *Candida antarctica* B lipase: An analysis of the secondary structure and its hydrolytic activity on triglycerides. *Biochimica et*
- Melo, V., & Cuamatzi, O. (2019). *Bioquímica de los procesos metabólicos* (3ra ed., pp. 128-130). Editorial Reverte.
- Navas González, S. M. A. (2019). *Biología en el día a día: Enzimas para uso industrial*. Fundación Antama. Recuperado en octubre de 2020
- Ndhaief, N., Hajej, Z., & Rezg, N. (2019). An optimal planning for a laundromat system with a multiple linen type in a hospital supply chain under subcontractor consideration. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 2213–2218.
- Nelson, D. L., Cox, M. M., & Lehninger, A. L. (2017). *Lehninger: Principios de bioquímica* (7.ª ed., pp. 194-204). W.H. Freeman.
- Niu, C., Zhou, D. B., Huang, X., Yin, Z. C., & Wang, G. W. (2024). Synthesis of [60]Fullerene-Fused Lactones via Carboxylic Acid Group-Directed C–H Bond Activation and Further Retro Baeyer–Villiger Reaction. *Organic Letters*, 26(25), 5300–5305. <https://doi.org/10.1021/ACS.ORGLETT.4C01676>

- Ogata, Y., & Sawaki, Y. (1967). The formation of peracids by the perhydrolysis with alkaline hydrogen peroxide. *Tetrahedron*, 23(8), 3327–3332. [https://doi.org/10.1016/S0040-4020\(01\)92300-2](https://doi.org/10.1016/S0040-4020(01)92300-2)
- Pérez, A., & Gómez, R. (2020). Determinación del contenido de paracloroanilina ex vivo producido por la interacción de hipoclorito de sodio y clorhexidina en tratamientos endodónticos. *Revista de Investigación en Ciencias Odontológicas*, 12(1), 45-52.
- Ponce, A. G., & de Saad, A. M. (2020). Uso de triacetina como plastificante en la formulación de películas comestibles. *Journal of Food Science and Technology*, 57(5), 1823-1830.
- Plou, F. J., de la Mata, I., López-Gallego, F., Lozano, P., & Gotor Fernández, V. (2023). *Situación actual de la biocatálisis y perspectivas futuras*. ASEBIO. Recuperado de <https://sebiot.org/wp-content/uploads/2023/05/Resu%CC%81menes-de-ponencias-sobre-Biocata%CC%81lisis-Aplicada.pdf>
- Rodríguez, M. J., & Gómez, L. R. (2021). Evaluación de triacetina como emoliente en formulaciones cosméticas. *International Journal of Cosmetic Science*, 43(3), 250-258.
- Saltos, I. (2021). EVALUATION OF THE CLEANING AND DISINFECTION PROCESS IN INTENSIVE CARE UNITS, IN SECOND AND THIRD LEVEL OF CARE HOSPITALS. 6(2).
- Sanchez Armengol, E., Blanka Kerezsi, A., & Laffleur, F. (2022). Allergies caused by textiles: control, research and future perspective in the medical field. In *International Immunopharmacology* (Vol. 110). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2022.109043>
- Scarfiello, J., Rusconi, M., Lanfranco, A., Azzi, E., Caracciolo, S., Ghigo, G., Renzi, P., & Deagostino, A. (2024). Catalyst-free chloroamination cyclization cascade with sodium hypochlorite: From N-(pentenyl)sulfonylamides to 2-(1-chloromethyl)pyrrolidines. *European Journal of Organic Chemistry*, 27(21), e202400108. <https://doi.org/10.1002/ejoc.202400108>
- Sun, S., & Syrén, P.-O. (2025). Enzymatic degradation of phthalate esters in the environment: Advances, challenges and opportunities. *Chemical Engineering Journal*, 508, 160640.
- Torres C. Juan.C., & Abonia G.Rodrigo. (2022). EVALUACIÓN DE ALGUNOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS CON EL FIN DE MEJORAR EL PROCESO DE LAVADO DE PRENDAS HOSPITALARIAS EN LA EMPRESA LAVACLINICAS S.A. [Grupo de Investigación de Compuestos Heterocíclicos]. Universidad del Valle.
- Vaddu, S., Kataria, J., Belem, T. S., Sidhu, G., Moller, A. E., Leone, C., Singh, M., & Thippareddi, H. (2021). On-site generated peroxy acetic acid (PAA) technology reduces Salmonella and Campylobacter on chicken wings. *Poultry Science*, 100(7), 101206. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101206>
- Vélez Rueda, J. O. (2020). Desarrollo de herramientas bioinformáticas para el estudio y predicción de la promiscuidad y multiplicidad de sustrato en enzimas (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Quilmes.
- Yukl, E. T., & Davidson, V. L. (2018). Diversity of structures, catalytic mechanisms and processes of cofactor biosynthesis of tryptophylquinone-bearing enzymes. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 654, 40–46.