

UNA NUEVA ERA PARA EL TRATAMIENTO DEL ACNÉ: LIBERACIÓN CONTROLADA DE MEDICAMENTOS MEDIANTE BIOPOLÍMEROS

A NEW ERA FOR ACNE TREATMENT: EXTENDED-RELEASE
MEDICATION THROUGH BIOPOLYMERS

SALAZAR CASTILLO, Abril ¹

FARÍAS CEPEDA, Lorena ¹

CASTAÑEDA FACIO, Adalí Oliva ¹

ROSALES MARINES, Lucero ¹

OVANDO MEDINA, Víctor Manuel ²

RESUMEN

El acné vulgaris afecta a 9.4 % de la población mundial con impactos físicos y psicológicos significativos. Los tratamientos convencionales presentan efectos secundarios, resistencia bacteriana y aplicaciones prolongadas que no siempre son eficaces. Este artículo explora el uso de biopolímeros en sistemas de liberación transdérmica como alternativa innovadora para el tratamiento de afecciones dermatológicas, con énfasis en el acné. Se analizan cinco biopolímeros principales (quitano, alginato, gelatina, nanocelulosa y colágeno), destacando su biocompatibilidad, biodegradabilidad y su capacidad para formar matrices inteligentes para la liberación controlada de fármacos. Estas matrices permiten una liberación dual de principios activos, combinando una acción rápida y sostenida contra *Cutibacterium acnes*. Además, se examinan la estructura cutánea, las vías de penetración y los métodos de liberación. Actualmente, persisten desafíos en el escalamiento industrial, la estabilidad de las formulaciones y la regulación. El futuro radica en la integración de biopolímeros, nanotecnología y medicina personalizada, lo que posiciona a estos sistemas como una revolución prometedora en la dermatología moderna.

Palabras clave: biopolímeros; liberación de fármacos; acné; dermatología.

ABSTRACT

Acne vulgaris affects 9.4% of the global population, with significant physical and psychological impacts. Conventional treatments often lead to side effects, bacterial resistance, and prolonged applications that are not always effective.

1. Facultad de Ciencias Químicas,
Universidad Autónoma de
Coahuila. Saltillo, Coahuila,
México.

2. Unidad Académica
Multidisciplinaria Región Altiplano.
Matehuala, San Luis Potosí,
México.

Correspondencia

lorenafarias@uadec.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0001-7835-9628>

Fecha de recepción

26 de noviembre de 2025.

Fecha de aceptación

5 de mayo de 2026.

*This article explores the use of biopolymers in transdermal drug delivery systems as an innovative alternative for treating dermatological conditions, focusing on acne. Five key biopolymers (chitosan, alginate, gelatin, nanocellulose, and collagen) are analyzed for their biocompatibility, biodegradability, and ability to form smart matrices for controlled drug release. These matrices enable dual release of active ingredients, combining rapid and sustained action against *Cutibacterium acnes*. Additionally, the article examines skin structure, penetration pathways, and delivery methods. Current challenges include industrial scaling, formulation stability, and regulatory issues. The future lies in integrating biopolymers, nanotechnology, and personalized medicine, positioning these systems as a promising revolution in modern dermatology.*

Keywords: biopolymers; drug delivery; acne; dermatology.

INTRODUCCIÓN

Las enfermedades de la piel como el acné, la alopecia, las úlceras, la dermatitis atópica, infecciones por hongos y bacterias, la psoriasis, la urticaria, y otras enfermedades subcutáneas, han aumentado anualmente un 46.8 % entre 1990 y 2017 (Giesey col., 2021; Yakupu col., 2023). Una de las afecciones más comunes es el acné vulgaris que afecta a un 9.4 % de la población (Tan & Bhate, 2015), con aproximadamente 117.4 millones de casos nuevos y 231.2 millones de casos prevalentes a nivel mundial (Chen col., 2022), especialmente entre los 16 a 24 años y uno de cada cinco adultos entre los 25 y 39 (Saurat col., 2024).

Se presenta con inflamación de la piel, comedones, pápulas, pústulas, nódulos y quistes (Gurung & Badola, 2023), aumenta la producción de sebo, hiperquebrantiza el infundíbulo folicular y favorece la proliferación de *Cutibacterium acnes*, desencadenando una respuesta inflamatoria (Vaglio & Céspedes, 2020). Pero no solo tiene impacto físico, sino también emocional y psicológico, generando ansiedad, depresión, baja autoestima, aislamiento social, trastornos alimentarios, dismorfia corporal, dermatilomanía e incluso riesgo de suicidio (Bewley col., 2021). Actualmente, los tratamientos convencionales más utilizados combinan los tópicos y los orales porque aportan, respectivamente, sus propiedades antiinflamatorias y su resistencia



bacteriana (Qothrunnadaa & Hasanah, 2021; Vaglio & Céspedes, 2020). Sin embargo, se recetan de manera prolongada, lo que puede provocar la aparición de otros tipos de enfermedades, como la faringitis, la candida o la infección por *Clostridium* (Qothrunnadaa & Hasanah, 2021).

Ante esta problemática, han surgido productos innovadores como los parches transdérmicos, que mediante un sistema de liberación transdérmica proporcionan efectos prolongados, prevención antibacteriana y comodidad para el consumidor (Prasetyo col., 2025). Estos sistemas suelen emplear polímeros o biopolímeros, que son materiales sintéticos o de origen natural por ser adhesivos, terapéuticos potenciales y capaces de modificar (Desai col., 2025). Específicamente, el uso de biopolímeros presenta ventajas al ser biodegradables, biodisponibles, no tóxicos, de bajo costo y con una probabilidad nula o baja de irritación cutánea (Güngör col., 2020).

El objetivo de este artículo es presentar una visión general acerca de los sistemas de liberación transdérmica basados en biopolímeros y sus ventajas para el tratamiento del acné y su comparación con sistemas convencionales para afecciones dermatológicas, identificando la necesidad de su tratamiento, así como los retos de su implementación.

LA PIEL COMO BARRERA

La piel es el órgano más grande del cuerpo humano, actúa como una barrera biológica y está compuesta por la epidermis, dermis e hipodermis. La epidermis, la capa más superficial, tiene cuatro subcapas: córnea, granulosa, espinosa y basal, en esta última se encuentran melanocitos, células precursoras de queratinocitos y células de Langerhans, que renuevan continuamente la epidermis (Bakhrushina col., 2025; Montes Belloso, 2023). Los queratinocitos de las capas espinosa y granulosa, acumulan queratina para formar la capa córnea, siendo la capa más importante porque protege a la piel de agresiones externas, la hidrata, restringe moléculas hidrofílicas y defiende contra patógenos (Bakhrushina col., 2025; Montes Belloso, 2023). La dermis proporciona sustento físico y nutrientes a la piel, la cual está compuesta por glándulas sudoríparas, folículos pilosos, terminaciones nerviosas, vasos linfáticos y fibroblastos; estos últimos producen colágeno y elastina, lo que confiere elasticidad y resistencia a la piel, así como facilidad

para la administración transdérmica de fármacos (Bakhrushina col., 2025; Montes Belloso, 2023). La hipodermis, la capa más profunda, se compone de tejido adiposo, fibras de colágeno y elastina (en menor cantidad que en la dermis) y funciona como reserva energética, amortiguador y aislante térmico (Bakhrushina col., 2025; Montes Belloso, 2023). En la Figura 1 se muestra un esquema de las capas de la piel y de las vías de absorción transdérmica.

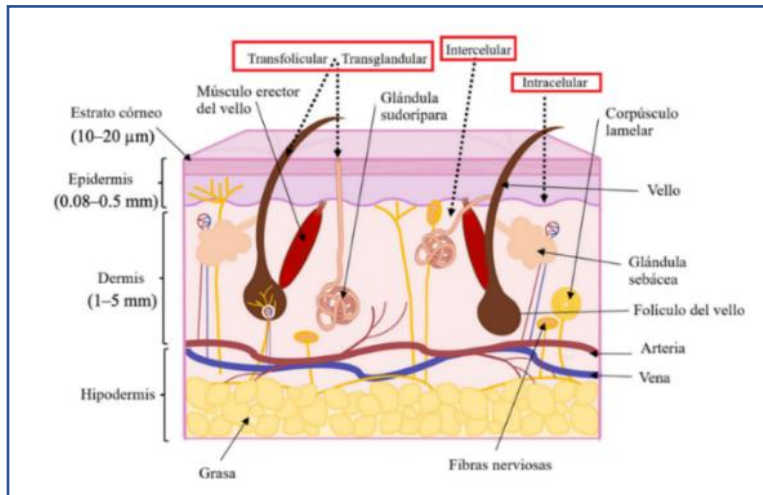


Figura 1. Esquema de la piel humana y las principales vías de penetración para sistemas transdérmicos de liberación de fármacos (Bakhrushina col., 2025).

LIBERACIÓN Y ABSORCIÓN TRANSDÉRMICA DE FÁRMACOS

Comprender la estructura de la piel es fundamental para analizar cómo los medicamentos pueden atravesarla. El estrato córneo es la mayor barrera para la absorción de fármacos, ya que el medicamento debe penetrar en esta capa y difundirse a través de las demás.

En la Tabla 1, se mencionan las tres vías de absorción transdérmica.



Tabla 1. Comparativa de las vías de absorción transdérmica de fármacos (Bakhrushina col., 2025; Kim col., 2020; Yu col., 2021).

Parámetro	Vía transcelular	Vía Intercelular	Vía transfolicular/transglandular
Camino	A través del interior de las células	A través de los espacios interlamelares y lípidos entre corneocitos	A través de folículos/glándulas con un inicio rápido de acción
Facilitación de transporte	No facilita difusión	Permite migración e inserción	Contribuye limitadamente a la permeación
Moléculas favorecidas	Pequeñas hidrofílicas	Lipídicas, anfifílicas e hidrofílicas	Iones, moléculas polares grandes, polímeros, partículas coloidales
Limitaciones	Alta resistencia inter/intra - corneocitaria	Barrera lipídica del estrato córneo y polaridad	Baja proporción del área total de la piel (1% de la superficie)

La liberación transdérmica de fármacos se presenta como una opción superior frente a tratamientos tradicionales, como cremas, ungüentos u orales. Cuenta con ventajas como la liberación constante y controlada del principio activo, la evasión del metabolismo hepático y la degradación por el ácido del tracto intestinal, y, por ser menos invasivos, genera comodidad para los pacientes (Alkilani col., 2022). Sin embargo, algunos parámetros afectan la eficacia de la liberación, como los factores fisiológicos (hidratación de la piel, temperatura corporal o edad) y las propiedades fisicoquímicas del fármaco (tamaño molecular < 500 Da, solubilidad, lipofilia, punto de fusión y dosis). Dado que no todos los fármacos cumplen estos criterios, se han desarrollado métodos que mejoran la penetración cutánea, clasificándose en métodos químicos, físicos y nanotecnológicos, o bien, liberación pasiva o activa (Bakhrushina col., 2025).

- Liberación pasiva/química: biodegradación, disolución o difusión de manera natural del fármaco desde los sistemas de administración hacia la piel; dependiendo de propiedades de formulación, dosis de compuesto activo y condiciones de la piel (He col., 2023). Se deben a la modificación del fármaco o a mejoras químicas (Yu col., 2021).
- Liberación activa/física: se aplican estímulos como la electricidad, el ultrasonido o la luz. Su eficiencia depende del control de parámetros del estímulo y propiedades del fármaco (He col., 2023).
- Permeabilidad nanotecnológica: uso de estructuras coloidales

(diámetro < 500 nanómetros) que mejoran la difusión del fármaco, la estabilidad fisicoquímica en nanopartículas y la liberación sostenida y controlada del principio activo (Yu col., 2021).

BIOPOLÍMEROS, LA NUEVA REVOLUCIÓN EN DERMATOLOGÍA

Los biopolímeros son macromoléculas obtenidas a partir de seres vivos (plantas, animales o microorganismos) compuestas de bloques químicos repetidos, son derivados de recursos renovables y capaces de descomponerse en el medio ambiente (Das col., 2023). Adicionalmente, si se obtienen a partir de residuos vegetales (nanocelulosa) o animales (gelatina), constituyen una alternativa responsable, ecológica, sostenible, económica y no contaminante (Yilmaz col., 2023). Son innovadores y sostenibles por su biodisponibilidad, origen renovable, naturaleza no tóxica, biodegradabilidad, facilidad de funcionalización, biocompatibilidad y bajo impacto ambiental, por ello, son utilizados en diversas aplicaciones (Dutta & Sit, 2024). Se utilizan en dermatología mediante la administración transdérmica de fármacos, ya que presentan propiedades antiinflamatorias, antimicrobianas y cicatrizantes, por su semejanza estructural con la matriz extracelular de los tejidos (Yilmaz col., 2023), es decir, el soporte natural que mantiene y organiza las células. En la Tabla 2 se mencionan las características de algunos de los biopolímeros más utilizados en dermatología, los cuales son; quitosano, alginato, gelatina, nanocelulosa y colágeno. Asimismo, proporcionan una liberación controlada-localizada del fármaco, liberándolo poco a poco en donde se requiere, según las matrices empleadas (estructuras elaboradas con estos biopolímeros) y los componentes activos a liberar; modulan la cinética de liberación, protegen contra infecciones, retienen agua y mejoran la penetración (Kuo col., 2021; Zaid Alkilani col., 2024), reducen efectos secundarios asociados a la administración oral de antibióticos (náuseas y esofagitis) al evitar el paso gastrointestinal y el metabolismo hepático (Wong col., 2023).

Tabla 2. Características principales de cinco biopolímeros utilizados en la liberación transdérmica de fármacos

Biopolímero	Origen	Propiedades clave	Aplicación dermatológica	Referencias
Quitosano	Desacetilación de quitina	Biocompatible, antibacteriano, antioxidante, mucoadhesivo, no tóxico	Acné, leishmaniasis, psoriasis, cáncer, cicatrización de heridas	(Kuo col., 2021; Mitura col., 2020; Zanganeh col., 2023)
Alginato	Algas marinas (ácido algínico)	Biodegradable, bioadhesivo, hidrosoluble, anti-inflamatorio, absorbente, antioxidante	Cáncer, acné, cicatrización de heridas	(Abasalizadeh col., 2020; Abourehab col., 2022)
Gelatina	Colágeno de tejidos animales	Biocompatible, biodegradable y fácil para procesamiento	Cicatrización de heridas, cáncer, dolor agudo y crónico	(Bahmani col., 2025; Yilmaz col., 2023)
Nano-celulosa	Fuente biotecnológica o bacterias	Liviana, biocompatible, bajo costo, permeable, superficie modificable y biodegradable	Cicatrización de heridas, acné, liberación de fármacos	(Ciolacu col., 2020; Leong col., 2023; Liu col., 2021)
Colágeno	Piel, tendones, ligamentos, cartílagos	Biocompatible, flexible, con similitud a matriz extracelular	Reducción de arrugas, hidratación, cicatrización de heridas, psoriasis	(Yilmaz col., 2023; Zhu col., 2022)

Estos biopolímeros forman matrices tridimensionales que encapsulan, protegen y liberan agentes activos controladamente, reduciendo su toxicidad (Das col., 2023); conocidas como matrices inteligentes porque responden a estímulos específicos biológicos o condiciones patológicas (Zhang & Wu, 2023), como cambios en el cuerpo o señales de enfermedad, liberando el medicamento.

En la Tabla 3 se presentan las matrices más comunes de estos biopolímeros.

Tabla 3. Principales matrices de biopolímeros para la liberación transdérmica de fármacos

Sistema de liberación / matriz	Qué son	Características principales	Aplicaciones	Referencias
Hidrogeles	Redes poliméricas entre-cruzadas	Gelifican en agua, retienen >10% de su peso, biocompatibles, liberación controlada, similares a tejido humano	Máscaras faciales, higiene super-absorbente, liberación de fármacos en piel	(Kim col., 2020; Mitura col., 2020)
Parches cutáneos y apósitos	Parches multicapa con fármaco con/sin adhesivo	No invasivos, uso prolongado, liberación pasiva o activa	Diabetes, acné, heridas, anti-concepción	(He col., 2023; Wong col., 2023)
Nano-compositos	Estructuras de nano-partículas con polímeros	Aumentan permeabilidad cutánea, liberación precisa, eficacia, no invasivos	Administración transdérmica avanzada en parches inteligentes	(Mohan col., 2025)
Micro-cápsulas	Vesículas con surfactantes n o iónicos	Penetran la piel, mejoran estabilidad, liberación controlada, producción a gran escala	Cosmética y farmacéutica, protección de activos	(Bai col., 2024; Mohan col., 2025)

IMPORTANCIA DEL TRATAMIENTO DEL ACNÉ

Con base en la investigación de Yakupu A. y colaboradores, las enfermedades micóticas, la dermatitis y las infecciones bacterianas registraron las tasas más altas de incidencia, discapacidad y mortalidad por edad, respectivamente. Sin embargo, el acné vulgaris destacó por presentar un crecimiento significativo en estas tres métricas (18 %, 16 % y 6 %, respectivamente) en comparación con las demás (Yakupu col., 2023). El acné es una enfermedad inflamatoria crónica de la unidad polisebácea, de origen multifactorial. Causada principalmente por la proliferación de la bacteria Cutibacterium acnes en los folículos polisebáceos, dañando tejidos, rompiendo la pared folicular o lesiones en la piel como comedones abiertos o cerrados, pápulas, pústulas y

nódulos (Kuo col., 2021; Qothrunnadaa & Hasanah, 2021). Los antibióticos orales son utilizados desde hace seis décadas para el tratamiento del acné vulgar, siendo las tetraciclinas las más recetadas, aplicándose en terapias prolongadas, no obstante, se deben tener cuidados para prevenir enfermedades como la faringitis, candida o infección por *Clostridium* (Del Rosso, 2015; Qothrunnadaa & Hasanah, 2021). Por ello, es necesario contar con terapias más eficaces para su tratamiento. En este sentido, el uso de la vía transdérmica es una alternativa prometedora para el tratamiento del acné utilizando la liberación dual de fármacos (capacidad de liberar en una matriz dos o más principios activos de manera rápida y luego sostenida) a comparación de los tratamientos convencionales (Lopez-Ramirez col., 2021), en la Figura 2 se muestran las ventajas del uso de biopolímeros como matrices de liberación de fármacos por vía transdérmica a comparación de tratamientos convencionales. Actualmente, los parches para el acné tienen una gran demanda debido a su capacidad para tratar y ocultar el acné, y son fáciles de usar, adquirir y transportar (Qothrunnadaa & Hasanah, 2021). Por ello, los parches transdérmicos elaborados con biopolímeros son una buena opción para su tratamiento.

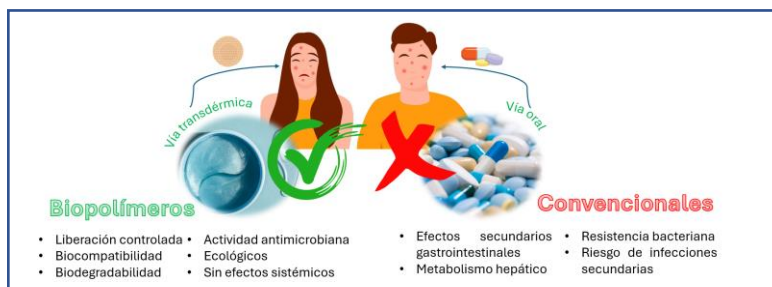


Figura 2. Ventajas de los biopolímeros como vía transdérmica frente a los tratamientos convencionales.

Bao Lam Thai Tran col., formularon películas nanocompuestas de AgNPs–Alg–Chi con liberación de clindamicina (antibiótico), con una concentración mínima inhibitoria (MIC) de 3.67 a 5.50 mg/mL frente a cepas de *Cutibacterium acné* demostrando actividad antibacteriana y biocompatibilidad (Thai Tran col., 2024). Asimismo, Chi-Wen Kuo col. desarrollaron parches bicapa cargados con extractos de *Cortex Phellodendron amurense* y *Centella asiática* de gelatina/quitosano, mostrando retención de agua, actividad antibacteriana contra *Cutibacterium acnes* (MIC 150 μ g/Ml) y biocompatibilidad (Kuo col., 2021). En la Figura 3 se muestra el



parche que utilizaron y su efecto anti-microbiano. También se desarrolló un parche transdérmico de quitosano con liberación dual de doxiciclina y nanopartículas de selenio (SeN), con liberaciones de 86.4 % de doxiciclina y 86.2 % de SeN, resultando en una mejora de la reparación de tejidos (Altememy Col., 2022).

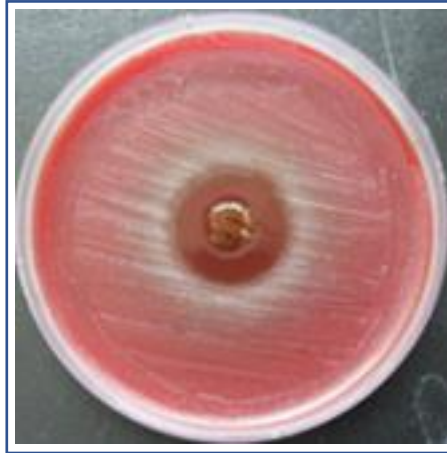


Figura 3. Fotografía de un parche antiacné de gelatina/quitosano (GC) cargado con *Phellodendron amurense* y *Centella asiática* (Kuo, 2021).

DESAFÍOS Y PERSPECTIVAS FUTURAS

Los biopolímeros y su uso en sistemas transdérmicos enfrentan desafíos como escalamiento industrial, producción de nanopartículas estables y limitada absorción o liberación de ciertos fármacos (Tapfumaneyi col., 2022). En el caso de los antibióticos, la resistencia bacteriana, penetración limitada y sus regulaciones estrictas requieren estudios preclínicos y clínicos (Zaid Alkilani col., 2024). El futuro radica en una integración sinérgica entre biopolímeros, nanotecnología y medicina personalizada con estrategias físicas y químicas capaces de tratar enfermedades cutáneas (Wong col., 2023; Zaid Alkilani col., 2024). Donde la economía circular y la síntesis verde prometen productos ambientalmente responsables y económicamente accesibles (Yilmaz col., 2023).

CONCLUSIONES

Este artículo ha visualizado de manera general, mediante la comprensión de la estructura de la piel y las vías de liberación y absorción de fármacos por vía transdérmica, el uso de biopolímeros como una solución innovadora para el



tratamiento del acné al mencionar la importancia de esta enfermedad, y destacando sus propiedades con aplicación dermatológica como la biocompatibilidad, capacidad de liberación controlada, reducción de efectos adversos y sostenibilidad ambiental. Donde, en conjunto con la liberación dual, permiten acción antibacteriana inmediata con efecto antiinflamatorio prolongado, optimizando los resultados en comparación con tratamientos orales y tópicos convencionales. No obstante, existen desafíos críticos en el escalamiento industrial, la estabilidad de principios activos, la regulación de compuestos emergentes y el desarrollo de nanosistemas optimizados para la penetración cutánea, los cuales deben ser supervisados para su aplicación clínica.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Coahuila por fomentar la investigación, a los autores por su cooperación y a SECIHTI por el apoyo mediante la beca número 2085676.

REFERENCIAS

- Abasalizadeh, F., Moghaddam, S. V., Alizadeh, E., Akbari, E., Kashani, E., Fazljou, S. M. B., Torbati, M., & Akbarzadeh, A. (2020). Alginate-based hydrogels as drug delivery vehicles in cancer treatment and their applications in wound dressing and 3D bioprinting. *Journal of Biological Engineering*, 14(1): 8. <https://doi.org/10.1186/S13036-020-0227-7>
- Abourehab, M. A. S., Rajendran, R. R., Singh, A., Pramanik, S., Shrivastav, P., Ansari, M. J., Manne, R., Amaral, L. S., & Deepak, A. (2022). Alginate as a Promising Biopolymer in Drug Delivery and Wound Healing: A Review of the State-of-the-Art. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(16): 9035-9092. <https://doi.org/10.3390/IJMS23169035>
- Alkilani, A. Z., Nasereddin, J., Hamed, R., Nimrawi, S., Hussein, G., Abo-Zour, H., & Donnelly, R. F. (2022). Beneath the Skin: A Review of Current Trends and Future Prospects of



Transdermal Drug Delivery Systems. *Pharmaceutics*, 14(6): 1152-1186. <https://doi.org/10.3390/PHARMACEUTICS14061152>

Altememy, D., Javdani, M., Khosravian, P., Khosravi, A., Khorasgani, M., Altememy, D., Javdani, M., Khosravian, P., Khosravi, A., & Khorasgani, E. M. (2022). Preparation of Transdermal Patch Containing Selenium Nanoparticles Loaded with Doxycycline and Evaluation of Skin Wound Healing in a Rat Model. *Pharmaceutical*, 15(11): 1381-1399. <https://doi.org/10.3390/PH15111381>

Bahmani, S., Khajavi, R., Ehsani, M., Rahimi, M. K., & Kalaei, M. R. (2025). A development of a gelatin and sodium carboxymethyl cellulose hydrogel system for dual-release transdermal delivery of lidocaine hydrochloride. *International Journal of Biological Macromolecules*, 284: 138034. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2024.138034>

Bai, D., Chen, H., Liu, L., Xiang, N., Zhang, J., Wu, C., Zhang, J., & Wang, F. (2024). Ionic liquid microcapsules for the topical delivery of pterostilbene: Enhanced transdermal delivery and anti-wrinkle and skin brightening effects. *Journal of Molecular Liquids*, 395: 123842. <https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2023.123842>

Bakhrushina, E. O., Shumkova, M. M., Avdonina, Y. V., Ananian, A. A., Babazadeh, M., Pouya, G., Grikh, V. V., Zubareva, I. M., Kosenkova, S. I., Krasnyuk, I. I., & Krasnyuk, I. I. (2025). Transdermal Drug Delivery Systems: Methods for Enhancing Skin Permeability and Their Evaluation. *Pharmaceutics*, 17(7): 936. <https://doi.org/10.3390/PHARMACEUTICS17070936>

Bewley, A., Lepping, P., & Taylor, R. E. (2021). *Psychodermatology in clinical practice*. Pp. 1–441, Springer, NY. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-54307-5/COVER>

Chen, H., Zhang, T. C., Yin, X. L., Man, J. Y., Yang, X. R., & Lu, M. (2022). Magnitude and temporal trend of acne vulgaris burden in 204 countries and territories from 1990 to 2019: an analysis from the Global Burden of Disease Study 2019. *British Journal of Dermatology*, 186(4): 673–683. <https://doi.org/10.1111/BJD.20882>

Ciolacu, D. E., Nicu, R., & Ciolacu, F. (2020). Cellulose-Based Hydrogels as Sustained Drug-Delivery Systems. *Materials*, 13(22): 5270-5307. <https://doi.org/10.3390/MA13225270>

Das, A., Ringu, T., Ghosh, S., & Pramanik, N. (2023). A comprehensive review on recent advances in preparation, physicochemical characterization, and bioengineering applications of biopolymers. *Polymer Bulletin* (Berlin, Germany), 80(7): 7247–7312. <https://doi.org/10.1007/S00289-022-04443-4>

Del Rosso, J. Q. (2015). Oral Doxycycline in the Management of Acne Vulgaris: Current Perspectives on Clinical Use and Recent Findings with a New Double-scored Small Tablet Formulation. *The Journal of Clinical and Aesthetic Dermatology*, 8(5), 19-26. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4445892/>

- Desai, S. R., Bhagwat, D. A., Singh, A. K., Kumbhar, R. B., & Khan, J. (2025). Bioadhesive polymers in transdermal formulations for skin disorders. *Current Opinion in Pharmacology*, 83: 102544. <https://doi.org/10.1016/j.coph.2025.102544>
- Dutta, D., & Sit, N. (2024). A comprehensive review on types and properties of biopolymers as sustainable bio-based alternatives for packaging. *Food Biomacromolecules*, 1(2): 58–87. <https://doi.org/10.1002/FOB2.12019>
- Giesey, R. L., Mehrmal, S., Uppal, P., & Delost, G. R. (2021). The Global Burden of skin and subcutaneous disease: a longitudinal analysis from the global burden of disease study from 1990-2017. *Journal of Cutaneous Medicine*, 5(2): 125–136. <https://doi.org/10.25251/SKIN.5.2.7>
- Güngör, S., Kahraman, E., Erdal, M. S., & Özsoy, Y. (2020). Chapter 8. Recent advances in biopolymer-based transdermal patches. In: *Biopolymer Membranes and Films: Health, Food, Environment, and Energy Applications*, Pp. 195–217, Elsevier, NY. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818134-8.00008-0>
- Gurung, A., & Badola, A. (2023). An updated review on acne. *World Journal of Biology Pharmacy and Health Sciences*, 14(03): 300–317. <https://doi.org/10.30574/wjbpshs.2023.14.3.0266>
- He, J., Zhang, Y., Yu, X., & Xu, C. (2023). Wearable patches for transdermal drug delivery. *Acta Pharmaceutica Sinica. B*, 13(6): 2298–2309. <https://doi.org/10.1016/J.APB.2023.05.009>
- Kim, B., Cho, H.-E., Moon, S. H., Ahn, H.-J., Bae, S., Cho, H.-D., & An, S. (2020). Transdermal delivery systems in cosmetics. *Biomedical Dermatology*, 4(1): 10. <https://doi.org/10.1186/S41702-020-0058-7>
- Kuo, C. W., Chiu, Y. F., Wu, M. H., Li, M. H., Wu, C. N., Chen, W. S., & Huang, C. H. (2021). Gelatin/Chitosan Bilayer Patches Loaded with Cortex Phellodendron amurense/Centella asiatica Extracts for Anti-Acne Application. *Polymers*, 13(4): 1–15. <https://doi.org/10.3390/POLYM13040579>
- Leong, M. Y., Kong, Y. L., Burgess, K., Wong, W. F., Sethi, G., & Looi, C. Y. (2023). Recent Development of Nanomaterials for Transdermal Drug Delivery. *Biomedicines*, 11(4): 1124. <https://doi.org/10.3390/BIMEDICINES11041124>
- Liu, S., Qamar, S. A., Qamar, M., Basharat, K., & Bilal, M. (2021). Engineered nanocellulose-based hydrogels for smart drug delivery applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 181: 275–290. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2021.03.147>
- Lopez-Ramirez, M. A., Kupor, D., Marchiori, L., Soto, F., Rueda, R., Reynoso, M., Narra, L. R., Chakravarthy, K., & Wang, J. (2021). Combinatorial microneedle patch with tunable release kinetics and dual fast-deep/sustained release capabilities. *Journal of Materials Chemistry B*, 9(9): 2189–2199. <https://doi.org/10.1039/D1TB00141H>

- Mitura, S., Sionkowska, A., & Jaiswal, A. (2020). Biopolymers for hydrogels in cosmetics: review. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 31(6): 1–14. <https://doi.org/10.1007/S10856-020-06390-W>
- Mohan, N., Nair, R. P. A. N., & Narayanasamy, D. (2025). Nanoparticle-integrated transdermal patches: a platform for next-generation drug delivery. *Drug Development Research*, 86(7): 70164. <https://doi.org/10.1002/DDR.70164>
- Montes Belloso, M. E. (2023). Dermocosmética y principales patologías de la piel. Sanidad y Ediciones, S.L.
- Prasetyo, B. E., Mariadi, Permata, Y. M., Laila, L., Victoria, V., Rafiqah, L., & Rahani, D. N. (2025). Fish gelatin and chitosan-based anti-acne patch with tea tree oil: development and evaluation. *International Journal of Applied Pharmaceutics*, 17(3): 237–242. <https://doi.org/10.22159/IJAP.2025V17I3.53714>
- Qothrunnadaa, T., & Hasanah, A. N. (2021). Patches for acne treatment: an update on the formulation and stability test. *International Journal of Applied Pharmaceutics*, 13(4): 21–26. <https://doi.org/10.22159/IJAP.2021.V13S4.43812>
- Saurat, J.-H., Halioua, B., Baissac, C., Perez Cullerell, N., Ben Hayoun, Y. B., Saint Aroman, M., Taieb, C., & Skayem, C. (2024). Epidemiology of acne and rosacea: A worldwide global study. *Journal of American Dermatology*, 90: 1016–1018. <https://doi.org/10.1186/ar4135>
- Tan, J. K. L., & Bhate, K. (2015). A global perspective on the epidemiology of acne. *The British Journal of Dermatology*, 172: 3–12. <https://doi.org/10.1111/BJD.13462>
- Tapfumaneyi, P., Imran, M., Mohammed, Y., & Roberts, M. S. (2022). Recent advances and future prospective of topical and transdermal delivery systems. *Frontiers in Drug Delivery*, 2: 957732. <https://doi.org/10.3389/FDDEV.2022.957732/BIBTEX>
- Thai Tran, B. L., Van Vo, T., Chu, T. P., Bach, D. T., Nguyen, T. Q., Bao Luu, P. H., Thuy Tran, V. T., Duong, H. H., Nguyen, N. H., Le, G. T., Tran, T. T., Tuong Tran, K. N., Cam Tuyen, L. T., Dinh, T. N., Uyen, N. N., Thu Nguyen, T. T., Thi Nguyen, N. Van, Nguyen, K. T., Nhu Tran, L. T., & Le, P. H. (2024). Antibacterial efficacy of low-dosage silver nanoparticle–sodium alginate–chitosan nanocomposite films against pure and clinical acne strains. *RSC Advances*, 14(45): 33267–33280. <https://doi.org/10.1039/D4RA05180G>
- Vaglio, R. F., & Céspedes, N. P. (2020). Acné vulgaris: actualizaciones en fisiopatología y tratamiento. *Revista Ciencia y Salud Integrando Conocimientos*, 4(4): 52-65. <https://doi.org/10.34192/CIENCIAYSALUD.V4I4.174>
- Wong, W. F., Ang, K. P., Sethi, G., & Looi, C. Y. (2023). Recent advancement of medical patch for transdermal drug delivery. *Medicina*, 59(4): 778. <https://doi.org/10.3390/MEDICINA59040778>

- Yakup, A., Aimaier, R., Yuan, B., Chen, B., Cheng, J., Zhao, Y., Peng, Y., Dong, J., & Lu, S. (2023). The burden of skin and subcutaneous diseases: findings from the global burden of disease study 2019. *Frontiers in Public Health*, 11: 1145513. <https://doi.org/10.3389/FPUBH.2023.1145513/BIBTEX>
- Yilmaz, E. G., Ece, E., Erdem, Ö., Eş, I., & Inci, F. (2023). A sustainable solution to skin diseases: ecofriendly transdermal patches. *Pharmaceutics*, 15(2): 579. <https://doi.org/10.3390/PHARMACEUTICS15020579>
- Yu, Y. Q., Yang, X., Wu, X. F., & Fan, Y. Bin. (2021). Enhancing permeation of drug molecules across the skin via delivery in nanocarriers: novel strategies for effective transdermal applications. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9: 646554. <https://doi.org/10.3389/FBIOE.2021.646554>
- Zaid Alkilani, A., Sharaire, Z., Hamed, R., & Basheer, H. A. (2024). Transdermal delivery system of doxycycline-loaded niosomal gels: toward enhancing doxycycline stability. *ACS Omega*, 9(31): 33542–33556. <https://doi.org/10.1021/ACSOMEGA.4C01224>
- Zanganeh, S. M., Tahvildari, K., & Nozari, M. (2023). Preparation and characterization of chitosan-alginate biopolymer loaded by clindamycin phosphate as an effective drug delivery system for the treatment of acne. *Research Square*, 2023: 1-20. <https://doi.org/10.21203/RS.3.RS-3598549/V1>
- Zhang, Y., & Wu, B. M. (2023). Current advances in stimuli-responsive hydrogels as smart drug delivery carriers. *Gels*, 9(10): 838. <https://doi.org/10.3390/GELS9100838>
- Zhu, J., Li, Z., Zou, Y., Lu, G., Ronca, A., D'Amora, U., Liang, J., Fan, Y., Zhang, X., & Sun, Y. (2022). Advanced application of collagen-based biomaterials in tissue repair and restoration. *Journal of Leather Science and Engineering*, 4(1): 1–19. <https://doi.org/10.1186/S42825-022-00102-6>