



Matemáticas contra el cáncer de próstata



Ciencia al Instante

El cáncer, segunda causa de muerte mundial, surge cuando células dañadas escapan de la muerte programada (apoptosis) y se multiplican sin control formando tumores. En México se diagnostican más de 200 mil casos anuales. El cáncer de próstata, el más común en hombres, es especialmente peligroso porque avanza silenciosamente durante décadas. Las terapias de privación de andrógenos (ADT) bloquean hormonas que alimentan el tumor, pero aplicadas continuamente generan resistencia. Aquí entra la ingeniería, usando modelos matemáticos y teoría de control, científicos diseñan protocolos intermitentes que alternan períodos con y sin medicamento, dificultando la adaptación del tumor y reduciendo efectos secundarios. Esta fusión de matemáticas, ingeniería y medicina permite predecir respuestas tumorales y optimizar tratamientos sin costosos experimentos previos, mejorando la calidad de vida de los pacientes.

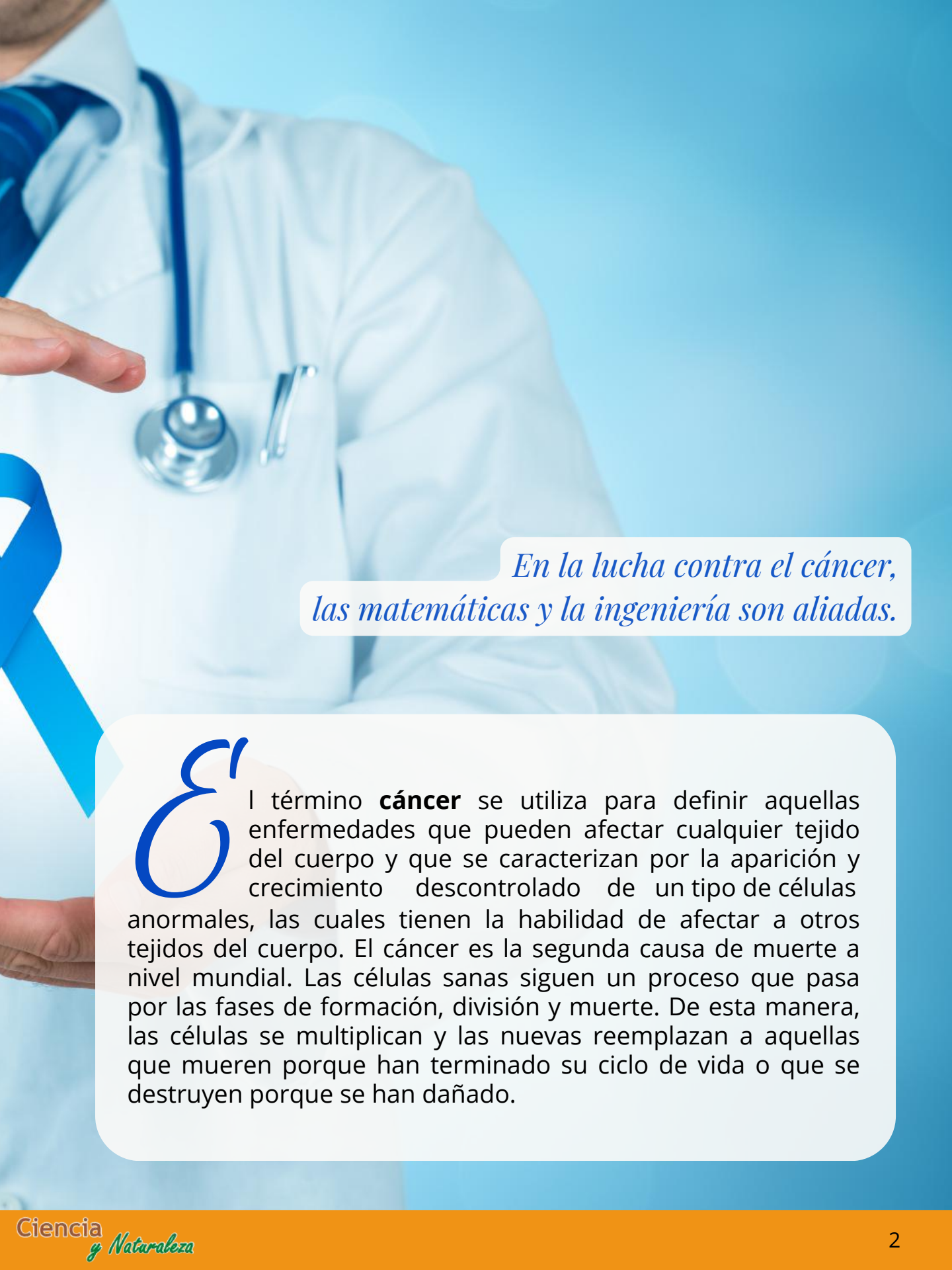


Matemáticas contra el cáncer de próstata

La teoría de control detrás de la
terapia de privación de
andrógenos

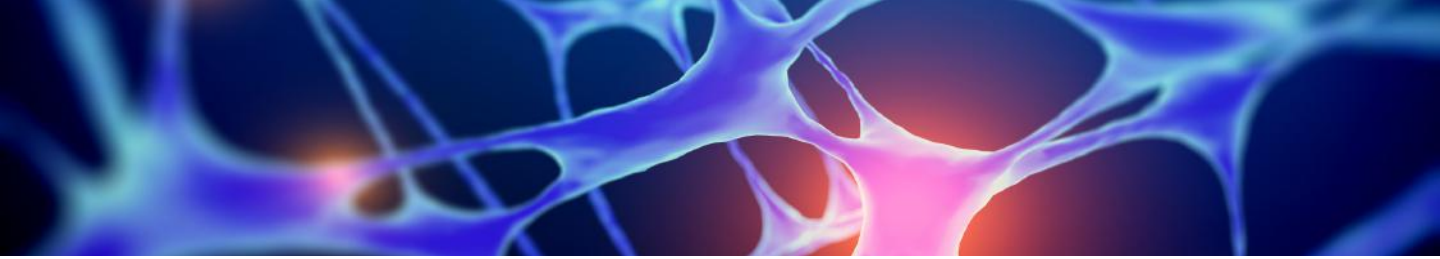
Cómo citar este artículo: Ortiz-Perez R, Saldivar B, Aguilar-Ibanez C. 2026. Matemáticas contra el cáncer de próstata. Revista Ciencia y Naturaleza (1198).



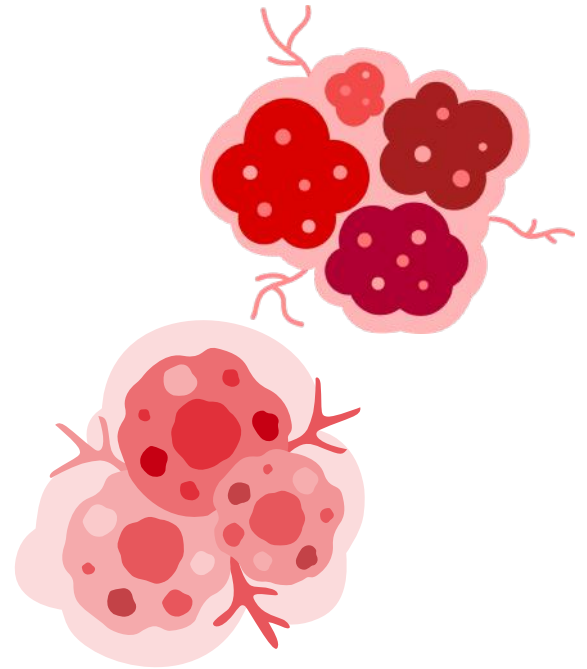


*En la lucha contra el cáncer,
las matemáticas y la ingeniería son aliadas.*

El término **cáncer** se utiliza para definir aquellas enfermedades que pueden afectar cualquier tejido del cuerpo y que se caracterizan por la aparición y crecimiento descontrolado de un tipo de células anormales, las cuales tienen la habilidad de afectar a otros tejidos del cuerpo. El cáncer es la segunda causa de muerte a nivel mundial. Las células sanas siguen un proceso que pasa por las fases de formación, división y muerte. De esta manera, las células se multiplican y las nuevas reemplazan a aquellas que mueren porque han terminado su ciclo de vida o que se destruyen porque se han dañado.

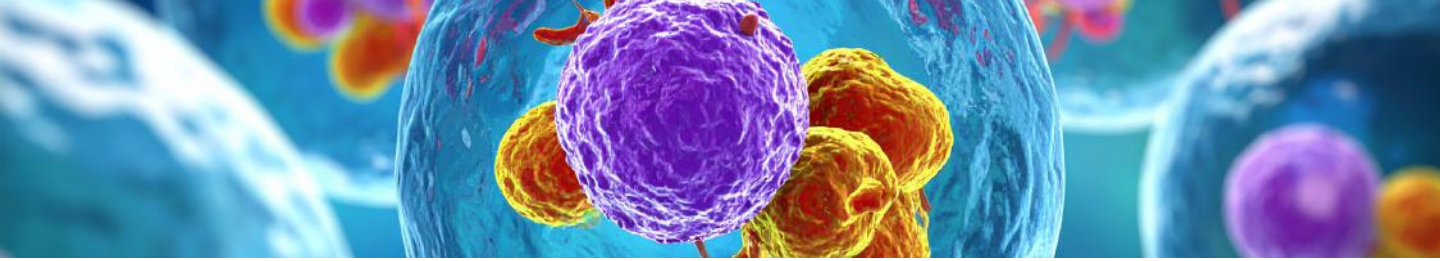


La muerte de las células dañadas se conoce como muerte celular programada o apoptosis. La apoptosis ocurre en los billones de células que forman nuestro cuerpo, sin embargo, en ocasiones este proceso falla y provoca que se produzcan nuevas células cuando no deben; o bien, que las células dañadas no se destruyan y comiencen a multiplicarse sin control, es decir, no obedecen a la muerte celular programada y forman masas o protuberancias mejor conocidas como tumores, que pueden ser benignos o malignos.



Para asegurar su supervivencia, los vasos sanguíneos se extienden hacia los tumores para llevar oxígeno y nutrientes, a este proceso se le conoce como angiogénesis. Aunque el sistema inmune suele destruir las células dañadas o anormales, las células tumorales tienen la capacidad de ocultarse o engañar al sistema inmune, al grado de que las células inmunes protegen al tumor en vez de atacarlo.

La Figura 1 muestra el proceso de formación de un tumor. Los tumores benignos pueden llegar a ser bastante grandes, pero no invaden otras partes del cuerpo, y cuando se extirpan no es común que regresen.



Por otro lado, cuando se extirpan los tumores malignos o cancerosos estos pueden regresar; además, pueden invadir tejidos cercanos y extenderse a otras partes del cuerpo a través de los sistemas sanguíneo y linfático, lo que se conoce como metástasis.

El cáncer es similar a un caballo de Troya, las células cancerosas son células normales que se han dañado y se multiplican sin control.

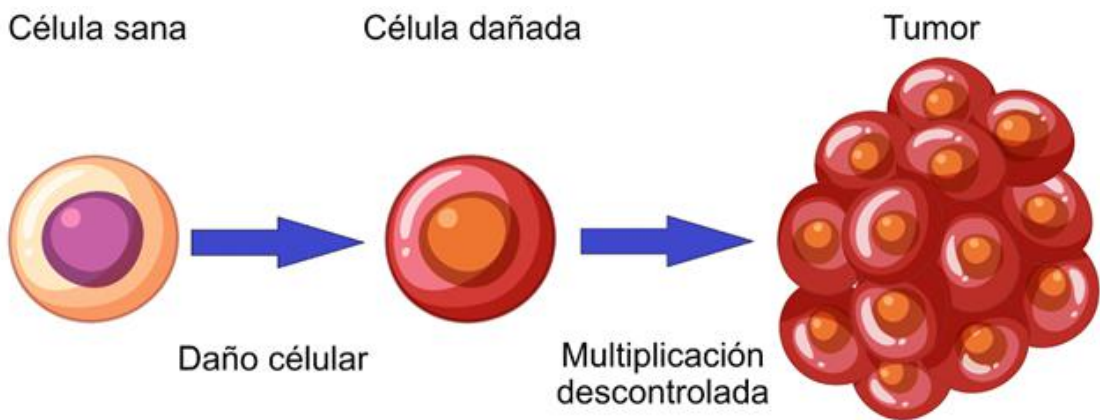


Figura 1. Proceso de formación de un tumor canceroso. Una célula sana sufre daño genético y, en lugar de morir mediante los mecanismos normales de control celular, sobrevive y comienza a dividirse de manera descontrolada.

Un estudio realizado en 2019 reveló que cada año, en México se presentan más de 200 mil casos nuevos de cáncer y más de 90 mil personas fallecen a causa de esta enfermedad, lo que la convierte en la tercera causa de muerte en el país.



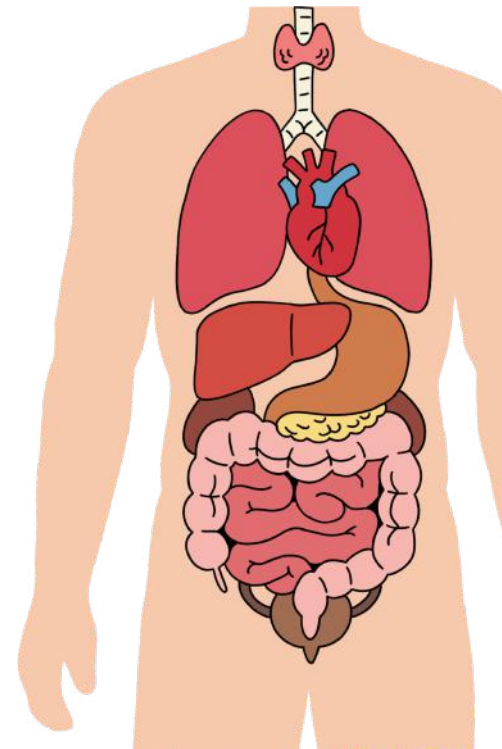


En la actualidad, el estudio del cáncer va más allá de la investigación clínica de fenómenos biológicos como la metástasis y la angiogénesis, e incluye también áreas como las matemáticas y la teoría de control. En estos campos, el cáncer se analiza de manera teórica mediante modelos dinámicos, es decir, expresiones matemáticas que buscan describir los fenómenos observados en la interacción entre el sistema inmune y el tumor.

Factores de riesgo y tratamientos

El cáncer se puede originar en cualquier parte del cuerpo y recibe su nombre por el lugar en el que se inició. El cáncer aparece debido a errores en los genes que controlan la formación y multiplicación de las células. Estos errores se deben a causas hereditarias, aunque también existen factores externos que pueden aumentar las probabilidades de desarrollar cáncer.

Por ejemplo, la exposición a ciertas sustancias y materiales como asbesto, arsénico, humo de tabaco, microplásticos, colorantes y conservadores de alimentos, así como, la exposición sin protección a fuentes de radiación como combustibles nucleares o los rayos ultravioleta del sol.



Algunos tipos de cáncer se desarrollan a partir de ciertas enfermedades o infecciones por virus. Por ejemplo, el virus del papiloma humano puede desencadenar cáncer cervicouterino, y la hepatitis B y C puede llevar al desarrollo de cáncer de hígado.

Tumor

La edad es otro factor de riesgo; por lo general, las células dañadas son eliminadas del cuerpo, sin embargo, el cuerpo gradualmente pierde esta capacidad a medida que envejece.

Algunos tipos de cáncer se desarrollan debido a ciertas sustancias químicas en los alimentos procesados.

El tratamiento para el cáncer depende del tipo de cáncer a tratar y del avance de la enfermedad. Algunos tratamientos para el cáncer aprovechan las diferencias entre las células sanas y las cancerosas para atacar a estas últimas con el menor daño posible a las células sanas.



Los objetivos de los tratamientos son diferentes, algunos se enfocan en curar el cáncer, otros buscan detener su avance y unos más se centran en aliviar los síntomas.



Los tratamientos más comunes son: la cirugía, para extraer las masas tumorales; la quimioterapia, que usa fármacos especiales para reducir o eliminar los tumores; la radioterapia, que usa radiaciones parecidas a los rayos X para eliminar células dañadas; la terapia hormonal, para inhibir el efecto de las hormonas que las ayudan a multiplicarse; la inmunoterapia, que potencia el sistema inmune para combatir a las células cancerosas, evitando los efectos secundarios de otras terapias más agresivas; el trasplante de médula ósea, en el que se reemplazan las células de la médula que se pierden debido a la quimioterapia o radioterapia.



Cáncer de próstata

La próstata es una glándula del tamaño de una nuez que forma parte del aparato reproductor masculino. Se localiza debajo de la vejiga y rodea parte de la uretra, que es el tubo que conduce la orina desde la vejiga. El cáncer de próstata es el cáncer más común en hombres y es el segundo tipo de cáncer al que se le atribuyen más muertes, pues se trata de una enfermedad indolora que avanza lentamente y causa síntomas hasta que está en etapas avanzadas.



Los síntomas, si es que se presentan, pueden aparecer hasta 30 años después del inicio de los cambios celulares, la edad promedio de diagnóstico es alrededor de los 67 años. En el esquema de la Figura 2 se observa un tumor en la próstata que presiona la uretra, lo que causa problemas urinarios en un paciente sintomático.

La enfermedad se vuelve peligrosa una vez que la masa tumoral comienza a crecer rápidamente y se propaga fuera de la próstata. Por lo general, el cáncer de próstata se propaga a los ganglios linfáticos, el hígado y frecuentemente a los huesos.



El cáncer de próstata es una enfermedad lenta que puede desencadenar síntomas hasta 30 años después del inicio de la enfermedad.

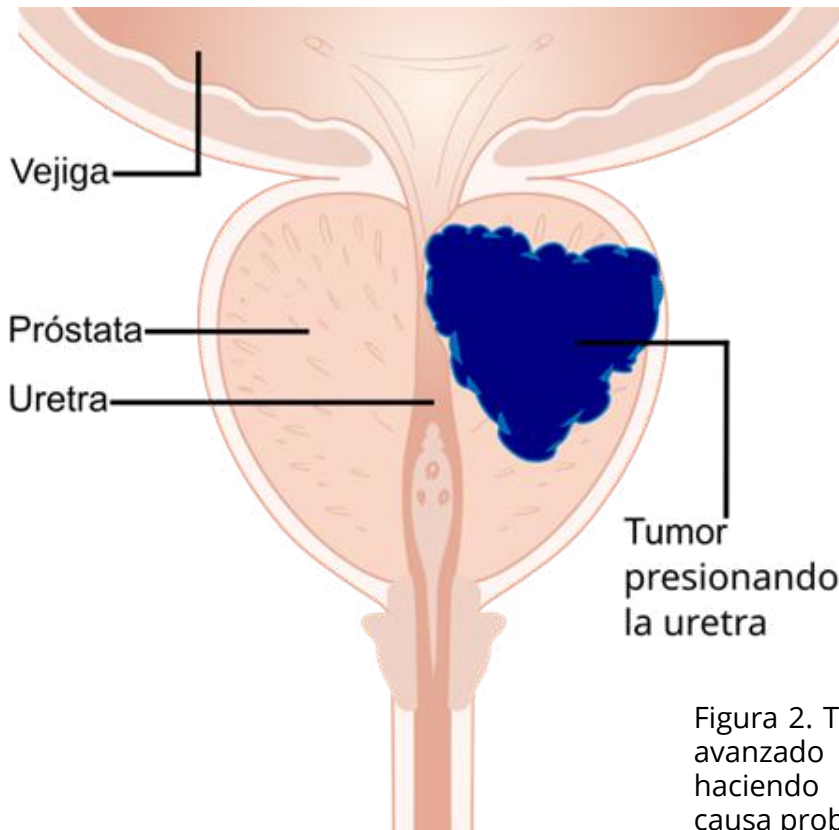
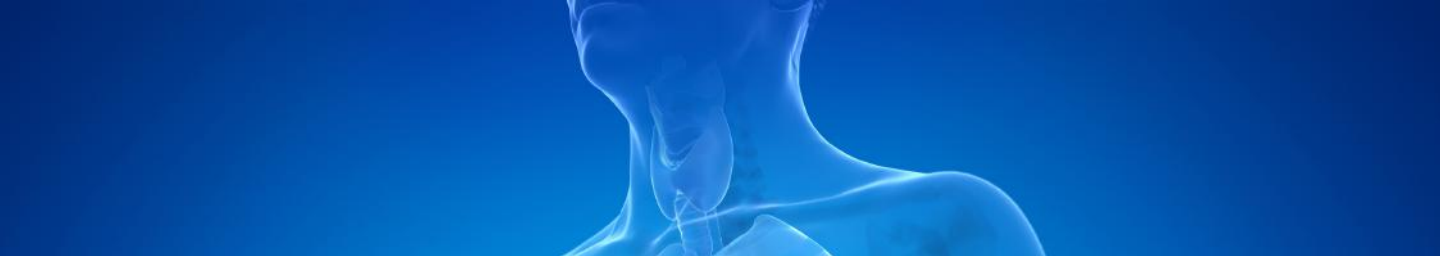


Figura 2. Tumor de un cáncer de próstata avanzado en un paciente sintomático haciendo presión en la uretra, lo cual causa problemas urinarios.

Para diagnosticar esta enfermedad, se debe realizar una exploración clínica de próstata y un estudio de laboratorio llamado Antígeno Prostático Específico (PSA, por sus siglas en inglés), el cual se realiza mediante una muestra de sangre. Las probabilidades de sobrevivir al cáncer de próstata son casi del 100% si la enfermedad es diagnosticada en fases tempranas.

Entre los tratamientos para la enfermedad se encuentran la cirugía y la radioterapia en la parte afectada, siempre y cuando el cáncer no se haya propagado a otras partes del cuerpo. Se sabe que el crecimiento del cáncer de próstata se ve favorecido por las hormonas masculinas denominadas andrógenos, como lo es la testosterona.



Los testículos producen más del 90% de los andrógenos del cuerpo, por lo que la orquiectomía que es la extirpación quirúrgica de los testículos y la castración química se utilizan como tratamientos contra el cáncer de próstata.



La castración química consiste en el uso de fármacos que reducen de manera sostenida la producción de testosterona, lo que disminuye o incluso suprime la actividad de los testículos. Los fármacos utilizados son análogos o agonistas de la hormona liberadora de gonadotropinas que se produce en la hipófisis y regula el funcionamiento de los testículos y antagonistas de la Hormona Liberadora de la Hormona Luteinizante (LHRH, por sus siglas en inglés) que se produce en el hipotálamo y regula la producción de testosterona por los testículos.

Tanto la castración quirúrgica como la química tienen como objetivo frenar la producción de andrógenos para limitar el crecimiento tumoral; por esta razón, ambas se agrupan bajo el nombre de terapias de privación de andrógenos (ADT, por sus siglas en inglés). Sin embargo, debido a que la castración química suele generar un menor impacto psicológico, esta opción es generalmente la preferida.

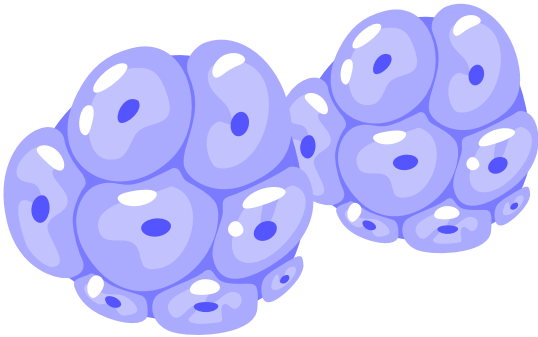


Por otra parte, aun cuando las ADT bloquean la producción de andrógenos en los testículos, las glándulas suprarrenales, ubicadas sobre los riñones, continúan produciendo estas hormonas, aunque en una proporción mucho menor, inferior al 10 % del total.



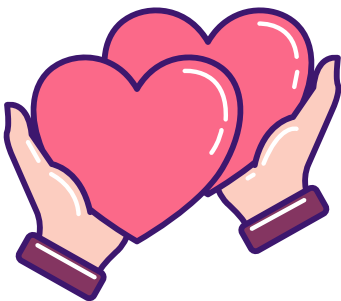
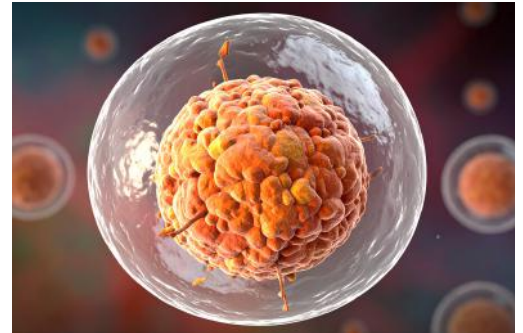
Las terapias de privación de andrógenos consisten en evitar que los testículos produzcan hormonas como la testosterona que estimulan la producción de células tumorales.

Las ADT son eficaces para tratar la enfermedad porque reducen las concentraciones de andrógenos o bloquean su acción, lo que retrasa e incluso puede detener el crecimiento tumoral.



Sin embargo, cuando los niveles de estas hormonas disminuyen, algunas células tumorales pueden transformarse (transdiferenciarse) en un tipo celular capaz de multiplicarse sin depender de los andrógenos e, incluso, de producirlos por sí mismas.

Por ello, y con la contribución de las glándulas suprarrenales, los andrógenos no se eliminan por completo del organismo, lo que puede permitir que el tumor continúe creciendo a pesar del tratamiento. La Figura 3 muestra un esquema de la evolución de un cáncer de próstata resistente a la ADT.



Las ADT pueden producir diversos efectos secundarios, entre los más comunes se encuentran la disminución del deseo sexual, disfunción eréctil, osteoporosis, diabetes, pérdida de musculatura y fuerza física, aumento de peso y colesterol, cambios de humor, fatiga y crecimiento de los senos (ginecomastia).



Estas terapias se utilizan en pacientes cuyo cáncer reaparece después de cirugía o radioterapia, o cuando la enfermedad ya ha hecho metástasis. Dado que, en la mayoría de los casos en que el cáncer de próstata se ha propagado a otras partes del cuerpo, la enfermedad es incurable; por lo tanto, la ADT se emplea principalmente para extender y mejorar la calidad de vida de los pacientes afectados.

En la mayoría de los casos, las terapias de privación de andrógenos se usan para pacientes con cáncer en etapas avanzadas, para prolongar y mejorar su calidad de vida.

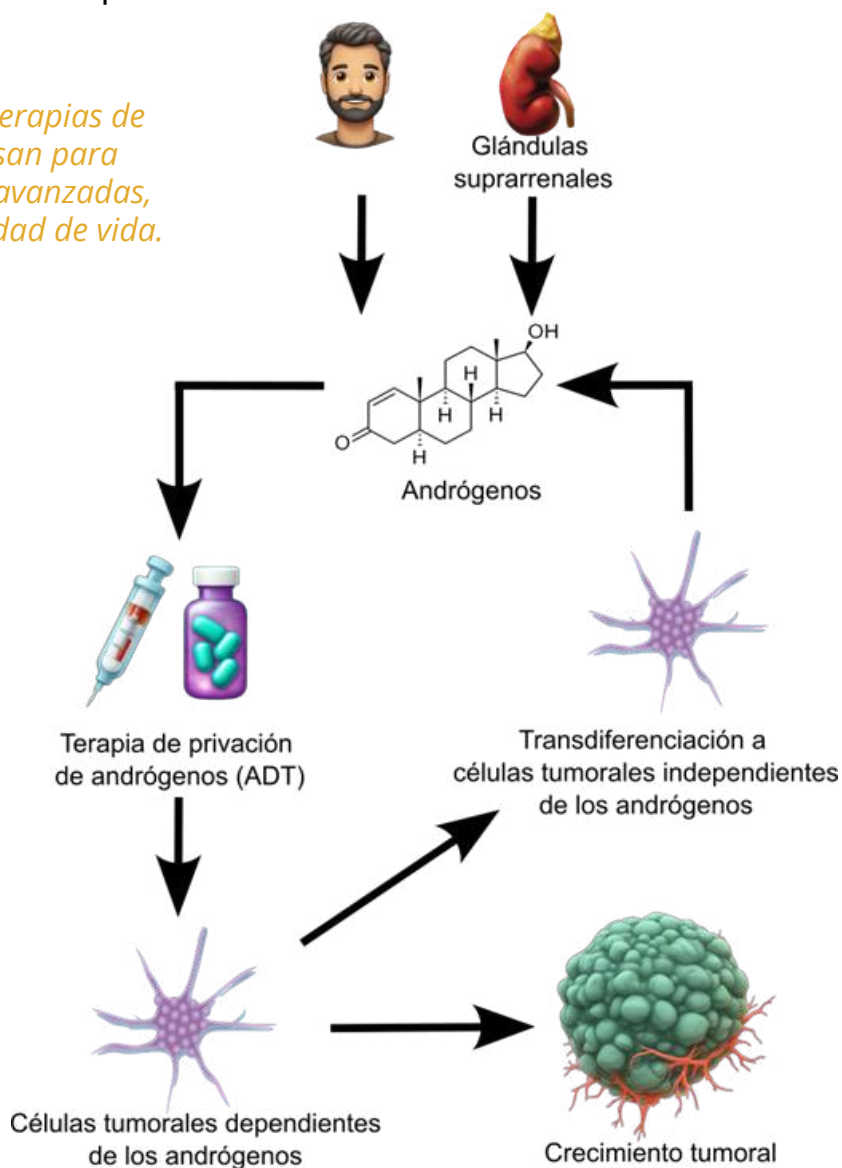


Figura 3. Crecimiento tumoral a pesar del tratamiento de privación de andrógenos debido a la producción de la hormona por células tumorales independientes de los andrógenos y las glándulas suprarrenales.



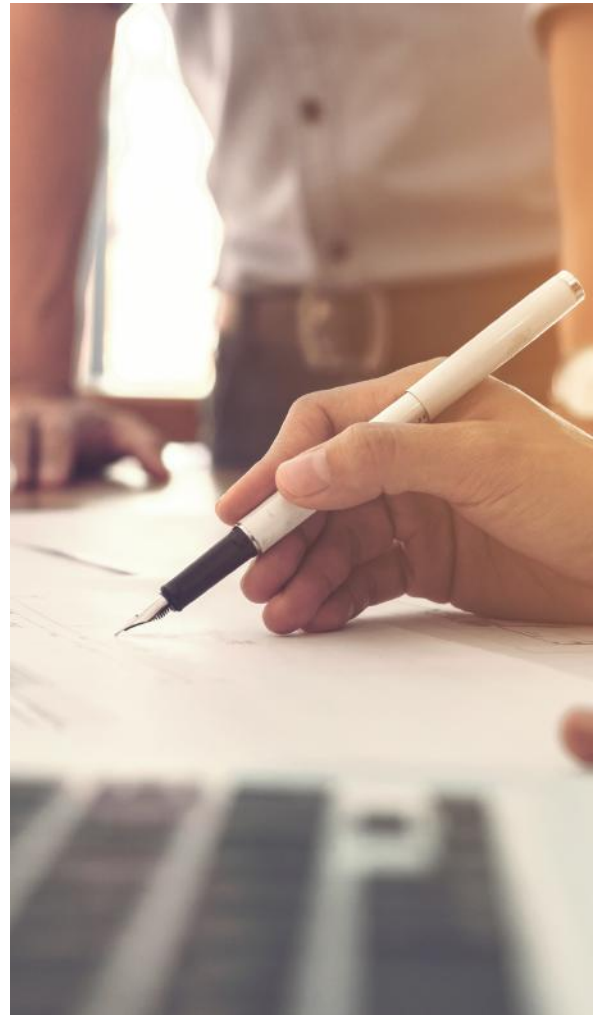
Teoría de control: ingeniería contra el cáncer

El cáncer de próstata es investigado en el área médica con un enfoque clínico, mediante experimentación biológica donde se usan cultivos de células tumorales, animales de laboratorio, así como ensayos con personas enfermas que han accedido a participar en dichas investigaciones.

En todos los casos se busca conocer los efectos favorables y adversos de nuevos tratamientos, entre ellos se encuentran: quimioterapias, inmunoterapia, radioterapia, terapias hormonales, terapias dirigidas a atacar ciertas características de las células tumorales, trasplantes de células madre, así como las combinaciones de dos o más terapias.

Por otro lado, existen investigaciones desde un punto de vista distinto, mediante el uso de herramientas matemáticas y de ingeniería.

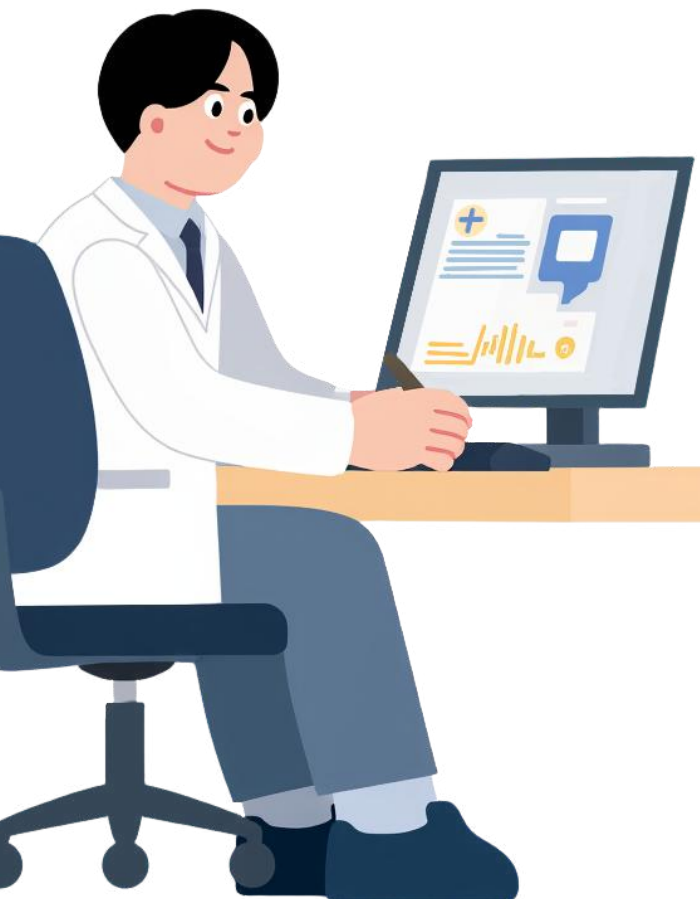
La teoría de control se enfoca en el diseño de sistemas que regulan su comportamiento de manera deseada mediante controladores.





Sus principales aplicaciones se encuentran en la ingeniería, abarcando áreas como eléctrica y electrónica, mecánica, robótica, aeroespacial, industrial, telecomunicaciones, computación, naval, energía y civil. Sin embargo, la teoría de control también se ha incorporado en campos como la agricultura, el medio ambiente, las finanzas, la economía y la salud.

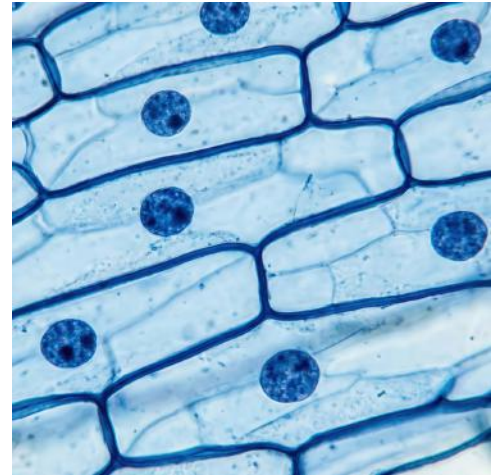
En el ámbito de la salud, la teoría de control ha sido utilizada durante mucho tiempo. Diversos equipos médicos se benefician de sus principios para mantener posiciones, realizar movimientos precisos, interpretar datos y, en algunos casos, administrar radiaciones con exactitud y en las dosis adecuadas.



En el tratamiento contra el cáncer, la teoría de control está presente en los aceleradores lineales que se usan en la radioterapia contra ciertos tipos de cáncer pues ayuda a que los movimientos de la máquina sean precisos y a que la intensidad de la radiación se ajuste correctamente durante la sesión, minimizando el daño a tejidos sanos. En la quimioterapia e inmunoterapia, las bombas de infusión inteligentes mantienen un flujo constante de fármacos y lo pueden modificar de acuerdo con los signos vitales del paciente.



Además, sistemas automatizados de cultivo celular y biorreactores se emplean para producir células madre y llevar a cabo trasplantes para regenerar tejidos dañados por terapias agresivas como la radioterapia y la quimioterapia que destruyen células tumorales y células sanas.



En la actualidad, las aplicaciones de la teoría de control en la salud han ido más lejos. Se han desarrollado modelos matemáticos, se han planteado análisis de estabilidad y se han diseñado estrategias de control no solo del cáncer de próstata, sino de diversas enfermedades.

Con este enfoque, es posible reproducir algunos fenómenos (también conocidos como dinámicas) observados en el cáncer, como pueden ser las interacciones entre las células tumorales y las células del sistema inmunológico, la relación entre la concentración de ciertas hormonas y el número de células tumorales, así como las reacciones de las células tumorales y del sistema inmune ante algún tipo de tratamiento.

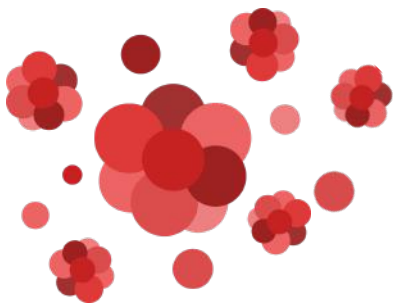
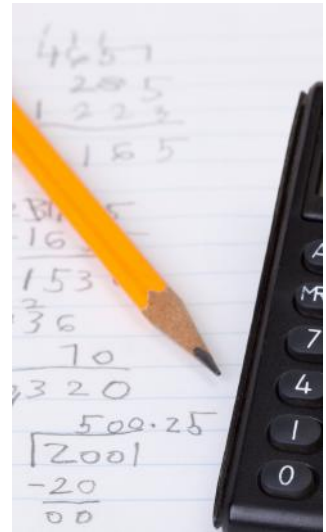
Los modelos matemáticos se definen empleando datos que previamente fueron obtenidos en investigaciones clínicas; algunos valores de los parámetros se ajustan hasta que el error entre los datos reales y las simulaciones sean tan cercanos a cero como sea posible.



Con los modelos matemáticos correctamente ajustados, es posible realizar simulaciones computacionales y predecir el comportamiento de las células tumorales en diferentes situaciones sin la necesidad de realizar experimentos en laboratorios.

En los últimos años se han utilizado herramientas matemáticas y de ingeniería para comprender mejor el comportamiento de las células tumorales.

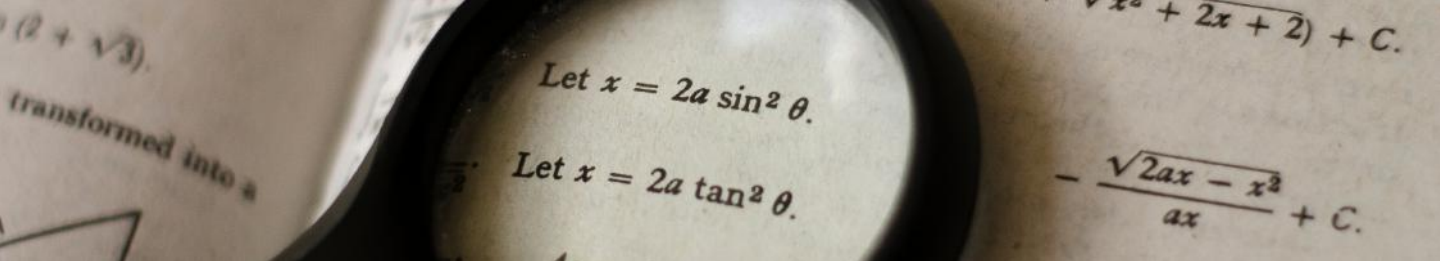
En el caso del cáncer, los modelos matemáticos permiten diseñar protocolos óptimos de administración de terapias. Empleando herramientas de la teoría de control, se ha podido identificar las condiciones bajo las cuales la enfermedad evoluciona a un estado latente, en el que no se produce crecimiento tumoral.



Se sabe que, en la mayoría de los casos, el cáncer de próstata puede volverse resistente a la supresión de andrógenos, tanto por la naturaleza permanente de la castración quirúrgica como por la administración continua de la castración química, lo que puede provocar recaídas en el paciente.

Sin embargo, cuando la terapia química se aplica de forma intermitente, alternando periodos en los que se usan los fármacos con otros en los que se suspenden, las células tumorales se desarrollan en un entorno variable que dificulta su adaptación, retrasando la aparición de células resistentes a la terapia.



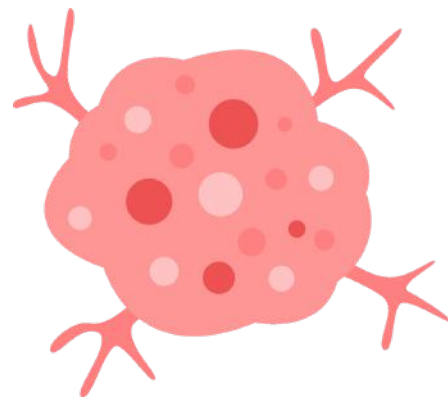


Además, esta modalidad reduce los efectos secundarios, mejorando la calidad de vida de los pacientes. La Figura 4 muestra un esquema ilustrativo de la diferencia entre la ADT química continua y la intermitente. La terapia intermitente permite un mejor control del crecimiento tumoral, retrasa el desarrollo de resistencia y contribuye a prevenir recaídas.



El análisis matemático ha respaldado que la resistencia puede retrasarse mediante la administración intermitente de la ADT química. Usando herramientas de la teoría de control, es posible determinar las dosis y los tiempos óptimos para administrar y suspender los fármacos.

De este modo, la combinación de modelos matemáticos y teoría de control permite predecir la respuesta tumoral ante distintos esquemas de terapia intermitente, optimizando tanto las dosis como los periodos de descanso. Asimismo, estos enfoques permiten identificar si la terapia puede inducir un estado de inactividad tumoral, ralentizar significativamente su crecimiento o incluso reducir el tamaño del tumor.

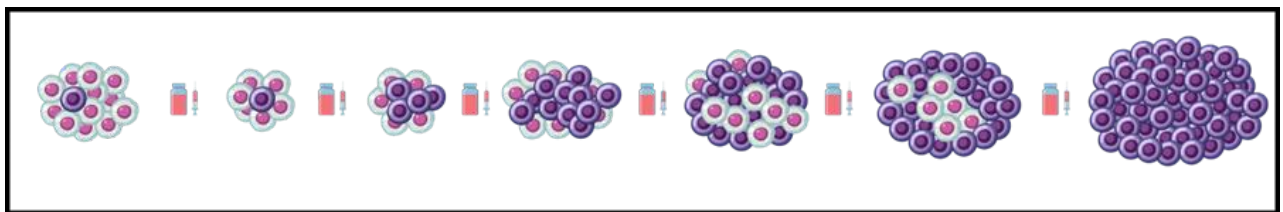


Los enfoques clínicos y de la teoría de control se complementan, ya que los modelos dependen de las observaciones realizadas mediante ensayos clínicos.

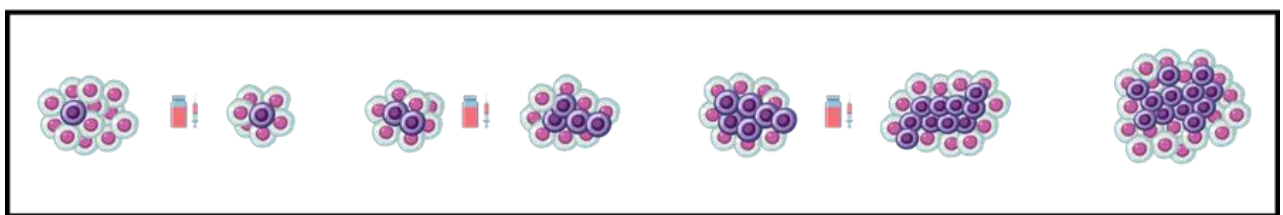


La idea es llevar al laboratorio los tratamientos y experimentos que resultan más prometedores en las simulaciones, reduciendo costos y asegurando mejores resultados. 🍀

La teoría de control contribuye al diseño de protocolos de aplicación de terapias contra el cáncer de próstata, estableciendo la dosis requerida y los tiempos de aplicación y suspensión de los fármacos.



Terapia continua



Terapia intermitente

-  Célula tumoral receptiva a la ADT
-  Célula tumoral resistente a la ADT
-  ADT

Figura 4. Terapia de privación de andrógenos continua e intermitente. Se muestra que la terapia intermitente además de combatir el crecimiento tumoral también retrasa la aparición de células tumorales resistentes a la ADT.



Agradecimientos

Proyecto apoyado por la Secihti en 2023, Ciencia de Frontera, CF-2023-I-722.

Para Consulta

- + Kiri S, Ryba T. 2024. Cancer, metastasis, and the epigenome. *Molecular Cancer* 23 (154): 1-27. [\[Link\]](#)
- + Beltran-Ontiveros SA, Contreras-Gutierrez JA, Lizarraga-Verdugo E, *et al.* 2019. National burden and trends for 29 groups of cancer in Mexico from 1990 to 2019: a secondary analysis of the global burden of disease study 2019. *Cancers* 16(1): 149. [\[Link\]](#)
- + Dabo-Trubelja A, Gottumukkala V. 2023. Review of cancer therapies for the perioperative physician. *Perioperative Medicine* 12(25): 1-12. [\[Link\]](#)
- + Kassab JG, Meeks RH, de Riese WT. 2024. Current clinical aspects of androgen deprivation therapy for locally advanced and metastatic prostate cancer: a scoping review for urologists and medical providers. *Research and Reports in Urology* 16: 187-193. [\[Link\]](#)
- + Turner L, Burbanks A, Cerasuolo M. 2021. PCa dynamics with neuroendocrine differentiation and distributed delay. *Mathematical Biosciences and Engineering* 18(6): 8577-8602. [\[Link\]](#)
- + Ortiz R, Saldivar B. 2024. Stability analysis for a prostate cancer model with distributed delay. *Memorias del Congreso Nacional de Control Automático 2024* 7: 49-54. [\[Link\]](#)
- + Ramírez Islas F, Saldivar B, Hernández Gómez AM. 2025. Intermittent androgen suppression therapy for prostate cancer. *Memorias del XX Congreso Latinoamericano de Control Automático 2025* 8: 161-166. [\[Link\]](#)
- + Garrido MP, Hernandez A, Vega M, *et al.* 2023. Conventional and new proposals of GnRH therapy for ovarian, breast, and prostatic cancers. *Frontiers in Endocrinology* 14: 1143261 [\[Link\]](#)



Crédito de imágenes en orden de aparición: Getty Images Pro (GIP), RDGraphics, Surachet99, IestariKhanty, Vesvostd, MOUNT PHOTOGRAPHY (MPHOTO), Pexels (Pex), Alemedia.id, Vidhi Vora's Images, Zerbor, Rido, sketchify (sk), Allies Interactive, pixelshot, atlasstudio, linear_design Images, Getty Images, sciencephoto, natalie.osipova, Toku & Nana (T&N), sasirin pamai's Images, Nugroho Dwi Hartawan, Jagat Kreasi, Getty Images Signature (GIS), Science Photo Library, Flixx Studio, Tinttrex, Surachet99 (S99), sparklestroke, Prosymbols, Alemedia.id, Will Sporer's Images, Seripe, freedomz. Crédito de figuras: Fig. 1, 3 y 4 fueron proporcionadas por los autores. Fig. 2 Cancer Research UK [Link]. Los autores declaran que ningún párrafo ha sido generado completamente o con más del 50% de sus palabras con herramientas AI.

Jorge Rocha
Editor Asociado Revista CyN

Diseño de publicación: Sofía Paz



Reynaldo Ortiz Perez

Departamento de Control Automático, Cinvestav. Posdoctorante en el Departamento de Control Automático del Cinvestav. Sus áreas de interés son el análisis de sistemas con retardo, ecuaciones diferenciales parciales y sus aplicaciones, sistemas biológicos, robótica, vehículos submarinos autónomos (AUV) e inteligencia artificial.

contacto: reynaldo.ortiz@cinvestav.mx



Belem Saldivar

Departamento de Control Automático, Cinvestav. Investigadora del Departamento de Control Automático del Cinvestav. Su trabajo se centra en el control no lineal y en los sistemas con retardos, con aplicaciones en áreas como la medicina, las energías renovables y el control de vibraciones mecánicas.

contacto: belem.saldivar@cinvestav.mx



Carlos Aguilar-Ibanez

Centro de Investigación en Computación, Instituto Politécnico Nacional
Investigador del Centro de Investigación en Computación del IPN. Se especializa en el diseño de algoritmos de control para estabilizar diferentes sistemas físicos. Entre sus intereses de investigación se encuentran la identificación, sincronización y estabilización de sistemas caóticos.

contacto: carlosaguilari@cic.ipn.mx