



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

CENTRO DE FÍSICA APLICADA Y
TECNOLOGÍA AVANZADA

IDENTIFICACIÓN DE ALGUNAS
ALTERACIONES EN EL TRACTO URINARIO
INFERIOR MASCULINO, MEDIANTE ONDAS
MECÁNICAS INDUCIDAS EN LA ORINA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN TECNOLOGÍA

PRESENTA:

ALAN EMMANUEL RESENDIZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ÁNGEL LUIS RODRÍGUEZ MORALES

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QRO. A 29 DE NOVIEMBRE DE 2023





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*El corazón del hombre traza su rumbo,
pero sus pasos los dirige el Señor*

Proverbios 16:9

Agradecimientos

No hay palabras suficientes para agradecer a Dios, quien con su gracia y amor me ha guiado cada día de mi vida. Doy gloria a Dios porque cada logro que he tenido y cada logro que tendré, fue y será por su causa.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México y al Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, por la educación que me dieron y todas las oportunidades que se me han brindado, contribuyendo de esta manera a formarme en los ámbitos académico, profesional y personal.

Al Dr. Ángel Luis Rodríguez Morales quien confió en mí y siempre me dio su apoyo. Agradezco por su guía y sus enseñanzas, por sus consejos y sus palabras de aliento, por siempre ver lo mejor en mí.

Al Dr. Achim Max Loske Mehling y al M. en C. Francisco Fernández Escobar quienes fueron los primeros en darme una oportunidad y formarme en la investigación y experimentación.

A mi grupo de sinodales conformado por el Dr. Jesús Manuel Dorador González, Dr. Marcelo López Parra, Dr. Marcos Ángel González Olvera y el M. en C. Francisco Fernández Escobar; por su tiempo y conocimiento aportados para hacer de este trabajo algo mejor.

A la Escuela Nacional de Estudios Superiores campus Juriquilla y al Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro por la financiación para asistir al Exprociencias Nacional 2019. Esta experiencia ayudó a nutrir el desarrollo de este proyecto.

A mi madre quien toda mi vida me ha apoyado de forma incondicional y me ha dado todo lo que he necesitado, a Enrique quien ha formado gran parte de la persona que soy. A mis hermanas Aranza y Milenka que confían en mí.

Finalmente agradezco a todos los amigos que formé en la universidad, por hacer de esta etapa de mi vida una de las mejores. De forma especial agradezco a Pepe, a Eddie y a Majo, que siempre estuvieron conmigo.

Resumen

Hoy en día existen métodos distintos de detección de enfermedades en el tracto urinario inferior tales como el análisis del antígeno prostático específico y el examen rectal digital o tacto rectal, además de técnicas para identificar hiperplasia prostática benigna y prostatitis crónica, sin embargo, estas técnicas en su mayoría son invasivas y tienen un alto grado de desaprobación por parte de la sociedad.

Con lo anterior en mente, este trabajo de tesis tiene por objetivo analizar el perfil de onda en un fluido para encontrar características que ayuden a diagnosticar entre pacientes masculinos con y sin afecciones en el tracto urinario inferior, todo esto con el fin de sentar bases para el desarrollo de una herramienta que complemente y/o mejore el diagnóstico de enfermedades y padecimientos uro-prostáticos.

Se construyó un modelo anatómico de algunos órganos del tracto urinario inferior masculino para simular el proceso de micción de un paciente sano y de un paciente con patologías y/o afecciones en alguno de los órganos que contempla el modelo. Además, se realizaron simulaciones mediante el *software Comsol Multiphysics* para representar el flujo de un fluido a través de un conducto de sección transversal circular y analizar su comportamiento ante obstrucciones en el conducto.

Se obtuvieron imágenes del chorro de agua a la salida del modelo anatómico. Mediante un análisis digital de las imágenes se encontró que existen patrones que diferencian la condición patológica. Por otro lado, las simulaciones efectuadas mediante *software* muestran diferencias en los campos de velocidades del flujo al comparar los casos en los que el conducto se encontraba o no con obstrucciones.

A través de estos resultados puede determinarse que es viable continuar con la investigación para dar mayor desarrollo a el método de análisis aquí planteado.

Índice general

Agradecimientos	III
Resumen	IV
Índice de figuras	VIII
Capítulo 1. Introducción	1
Problemática	3
Justificación de la investigación.....	6
Objetivos.....	8
General	8
Específicos	8
Hipótesis	8
Presentación del trabajo	8
Capítulo 2. Anatomía y alteraciones uro-prostáticas	10
Anatomía del aparato urogenital masculino.....	10
Vejiga	10
Próstata	11
Uretra.....	12
Proceso de micción	14
Alteraciones uro-prostáticas.....	15
Por enfermedad	15
Por trauma	23
Congénitas	24
Capítulo 3. Técnicas para detección de alteraciones uro-prostáticas	26
Tacto rectal	26
Antígeno prostático específico.....	27
Uretrografía	28
Estudios urodinámicos	30
Resonancia magnética	30
Ecografía transrectal.....	32
Tomografía por Emisión de Positrones y Tomografía Computarizada (TEP-TC)	33

Biopsia	35
Capítulo 4. Conceptos fundamentales de ondas y mecánica de fluidos	39
Ondas	39
Ondas mecánicas.....	39
Ondas transversales	39
Ondas longitudinales	40
Función de onda.....	41
Interferencia	42
Principio de superposición.....	43
Resonancia	43
Mecánica de fluidos	43
Clasificación del flujo de fluidos	44
Patrones de flujo y visualización	46
Capítulo 5. Desarrollo del proyecto	49
Pruebas con el modelo anatómico	49
Modelo matemático	52
Análisis del flujo.....	52
Formas de modos acústicos.....	54
Capítulo 6. Resultados	56
Modelo anatómico	56
Modelo matemático.....	58
Análisis del flujo.....	58
Formas de modos acústicos.....	58
Capítulo 7 Discusión	60
Capítulo 8. Conclusiones y trabajo a futuro	62
Anexos	64
Anexo 1.....	64
Anexo 2.....	65
Anexo 3.....	68
Anexo 4.....	70
Anexo 5.....	73
Anexo 6.....	76

Anexo 7.....	77
Referencias bibliográficas.....	79

Índice de figuras

Figura 1. Principales causas de mortalidad en hombres a escala nacional. Tomado de: Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2018.....	1
Figura 2. Incidencia y mortalidad de los tipos de cáncer que más afectaron a la población mexicana en 2018. Modificado de: World Health Organization, 2020.....	2
Figura 3. Número estimado de muertes por cáncer de próstata proyectado de 2020 a 2040. Modificado de: International Agency for Research on Cancer, 2019.	2
Figura 4. Número estimado de nuevos casos de cáncer de próstata proyectado de 2020 a 2040. Modificado de: International Agency for Research on Cancer, 2019.	3
Figura 5. Evolución de la tasa de mortalidad del cáncer de próstata en México. Fuente: Dirección General de Información en Salud, 2018; Secretaría de Salud, 2020.....	4
Figura 6. Costo económico anual del cáncer de próstata para el paciente y para el hospital en miles de pesos por paciente. Fuente: Márquez Heine et al., 2005.	4
Figura 7. Proyección de la incidencia del cáncer de próstata al 2025. Modificado de: International Agency for Research on Cancer, 2019.....	7
Figura 8. Proyección de la mortalidad por cáncer de próstata al 2025. Modificado de: International Agency for Research on Cancer, 2019.....	7
Figura 9. Vías medias e inferiores del aparato genitourinario masculino. Fuente: McAninch & Lue, 2014.....	10
Figura 10. Esquema frontal de la vejiga. Fuente: McAninch & Lue, 2014.....	11
Figura 11. Zonas divisorias de la próstata. Fuente: McAninch & Lue, 2014.	12
Figura 12. Esquema anatómico de la vejiga, próstata, uretra y pene. Modificado de: Mangera et al., 2010.	13
Figura 13. Aparato urogenital masculino. Fuente: McAninch & Lue, 2014.	14
Figura 14. Aparato urogenital masculino (derecha) y formación de tumor en la próstata (izquierda). Fuente: American Cancer Society.	15
Figura 15. Próstata normal (izquierda) y próstata con hiperplasia benigna (derecha). Fuente: Instituto Nacional del Cáncer, 2019.	16
Figura 16. Imagen obtenida por ultrasonido de estenosis en la uretra bulbar. Fuente: Cruz García-Villa et al., 2013.	21
Figura 17. Formación de tumores uroteliales en la uretra. Fuente: Geavlete et al., 2016.	21
Figura 18. Clasificación de los tumores según en lugar donde se forman: T1 formación de cáncer en la capa más profunda de la piel, T2 formación del cáncer en el cuerpo esponjoso, T3 formación del cáncer en el cuerpo cavernoso, CIS carcinoma en la piel del pene. Modificado de: Patient Information, 2017.....	22
Figura 19. Tacto rectal. Fuente: Instituto Nacional del Cáncer, 2019.	27
Figura 20. Imagen obtenida de una uretrografía. Se puede observar una estenosis en la uretra prostática (flecha de arriba) causada por una hiperplasia prostática benigna, y una estenosis en la uretra peneana (flecha de abajo). Modificada de: Gorriño et al., 2005.	29
Figura 21. Corte axial de la próstata obtenido mediante resonancia magnética. Se puede observar tejido normal de la próstata (flecha delgada) y tejido de un carcinoma prostático (flecha gruesa). Fuente: Vilanova et al., 2010.....	31
Figura 22. Imagen de una ecografía transrectal en la que se observan nódulos en la próstata de un paciente (espacio oscuro entre los puntos destacados con "+" y "x"). Fuente: Rodríguez et al., 2013.	33

Figura 23. Imágenes de la próstata (al centro de cada imagen) de un paciente operado por cáncer de próstata. Fuente: Colmener et al., 2018.....	35
Figura 24. Imagen de una ecografía transrectal de la próstata. Con una flecha se señala la aguja insertada que obtendrá la muestra del tejido. Fuente: Rodriguez et al., 2013.....	36
Figura 25. A la izquierda una aguja TRU-CUT 18GA (Pro Mag TM Angiotech) y a la derecha un dispositivo de disparo con corte automático. Fuente: Rodriguez et al., 2013.....	36
Figura 26. Onda transversal propagándose a lo largo de una cuerda. Fuente: Young & Freedman, 2009.....	40
Figura 27. Onda longitudinal que se propaga en un tubo lleno de agua. MAS son las siglas de Movimiento Armónico Simple. Fuente: Young & Freedman, 2009.....	40
Figura 28. Traslape de ondas causando interferencia constructiva (imagen izquierda) y destructiva (imagen derecha).....	42
Figura 29. Representación visual de los tipos de flujo. Modificado de: Munson et al., 2013b.....	45
Figura 30. Campo de vectores de velocidad instantánea (Flechas negras) y líneas de flujo (líneas grises). Modificado de: Hutter & Wang, 2016.....	46
Figura 31. Líneas de trayectoria de trazas blancas suspendidas en agua. La trayectoria elíptica es debida a olas que viajaban de forma horizontal. Tomado de: Cengel & Cimbala, 2012b.....	47
Figura 32. Línea de traza producidas por el humo de un cigarro. Tomado de: Hutter & Wang, 2016.....	47
Figura 33. Líneas fluidas generadas por un hilo de burbujas de hidrógeno. El movimiento del flujo va de izquierda a derecha. Tomado de: Cengel & Cimbala, 2012b.....	48
Figura 34. Modelo anatómico para simulación de alteraciones en el tracto urinario inferior. Este modelo simula algunos de los órganos que intervienen en el proceso de micción como lo son vejiga (1), uretra (2), próstata (3) y pene (4).	50
Figura 35. Imagen del chorro de agua a la salida del modelo anatómico para simulación de alteraciones en el tracto urinario inferior. Esta imagen se obtuvo al simular condiciones No patológicas.....	51
Figura 36. Ejemplo de imagen sometida a análisis digital. Se aplicó un filtro de contraste a la imagen para resaltar la forma de las ondas longitudinales y posteriormente medirlas...	51
Figura 37. Modelo de análisis del caso de interés "Tubería con deformación circular".	53
Figura 38. Modelo de análisis del caso de interés "Tubería con deformación elíptica".	53
Figura 39. Modelo de análisis del caso de interés "Tubería con múltiples deformaciones".	53
Figura 40. Modelo de tubería con sección transversal circular sin deformaciones.....	54
Figura 41. Modelo de tubería con sección transversal circular y con deformación.....	54
Figura 42. Comparación de los chorros de agua a la salida del modelo anatómico, entre las simulaciones Patológicas (A, B, C, D) y No patológicas (a, b, c, d).	56
Figura 43. Efecto del tipo de simulación en la longitud de la onda medida en el chorro de agua. Con los asteriscos (***) representando una $P < 0.0001$	57
Figura 44. Efecto del tipo de simulación en la amplitud de la onda medida en el chorro de agua. Con el asterisco (*) representando una $P = 0.0131$	57
Figura 45. Campos de velocidades de flujo para los casos de simulación A) Tubería con deformación circular, B) Tubería con deformación elíptica, C) Tubería con múltiples deformaciones y D) Tubería sin deformación.....	58
Figura 46. Campo de presiones visto desde la sección transversal de una tubería circular sin A) deformación y con B) deformación semicircular.	59
Figura 47. Dispositivo estandarizador de meato urinario.....	60

Capítulo 1

Introducción

Según datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, al 2015 la población de hombres mayores de 40 era de 18,230,647 de individuos (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2015) y con el paso del tiempo, este sector de la población aumentó su tamaño y con ello la cantidad de retos que suponen a la sociedad.

Este sector de la población es mayormente vulnerable a padecer una serie de diversas enfermedades tales como diabetes mellitus, cirrosis hepática, enfermedades cardíacas o enfermedades que generan afecciones al tracto urinario inferior (Secretaría de Salud, 2015). Entre estas últimas es importante destacar el cáncer de próstata, el cual se posiciona como la quinta causa de muerte entre hombres a nivel mundial y ocupa el segundo lugar entre los tumores malignos que afectan a la población de nuestro país (Miller et al., 2018; Vergara Méndez & Bautista-Samperio, 2002).

Según datos de mortalidad del INEGI, en 2017 las defunciones en hombres en México alcanzaron la cifra de 394,322. Las principales causas fueron las enfermedades del corazón, tumores malignos y diabetes mellitus. Dentro de los tumores malignos, el de próstata fue el que más decesos ocasionó (Figura 1) (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2018).

Causa	Defunciones
Enfermedades del corazón (Excluye paro cardíaco)	75,256
Diabetes mellitus	52,309
Tumores malignos	41,088
• De la próstata (6,676)	
• De la tráquea, de los bronquios y del pulmón (4,337)	
• Del estómago (3,377)	
Las demás causas	225,669
Total	394,322

Figura 1. Principales causas de mortalidad en hombres a escala nacional. Tomado de: Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2018.

Para el 2018 en nuestro país, el cáncer de próstata tuvo la segunda mayor tasa de incidencia (Figura 2), debajo del cáncer de mama; y la segunda mayor tasa de mortalidad solo por debajo del cáncer colorrectal (World Health Organization, 2020). Es así que en este año el cáncer de próstata fue el tipo de cáncer que más afectó a la población mexicana masculina.

Casos de cáncer más comunes (2018)

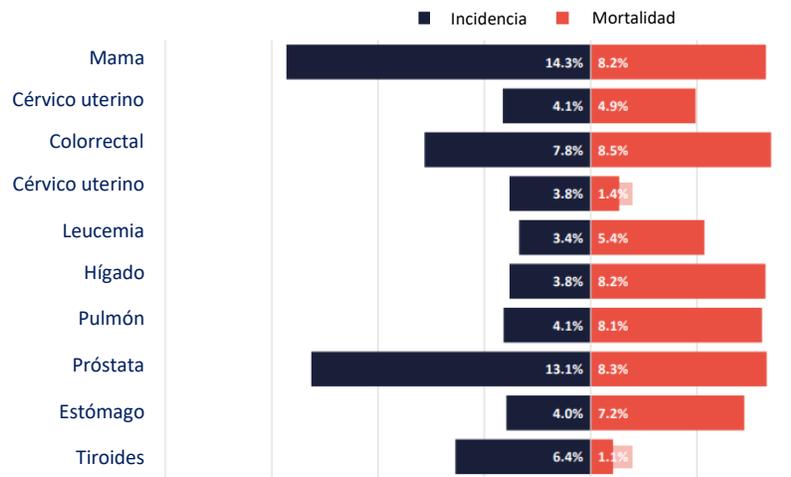


Figura 2. Incidencia y mortalidad de los tipos de cáncer que más afectaron a la población mexicana en 2018. Modificado de: World Health Organization, 2020.

Lo que es más alarmante es que según las proyecciones de la International Agency for Research on Cancer, la mortalidad e incidencia por esta enfermedad aumentarán un 106.5% y 88.6% respectivamente (Figuras 3 y 4).

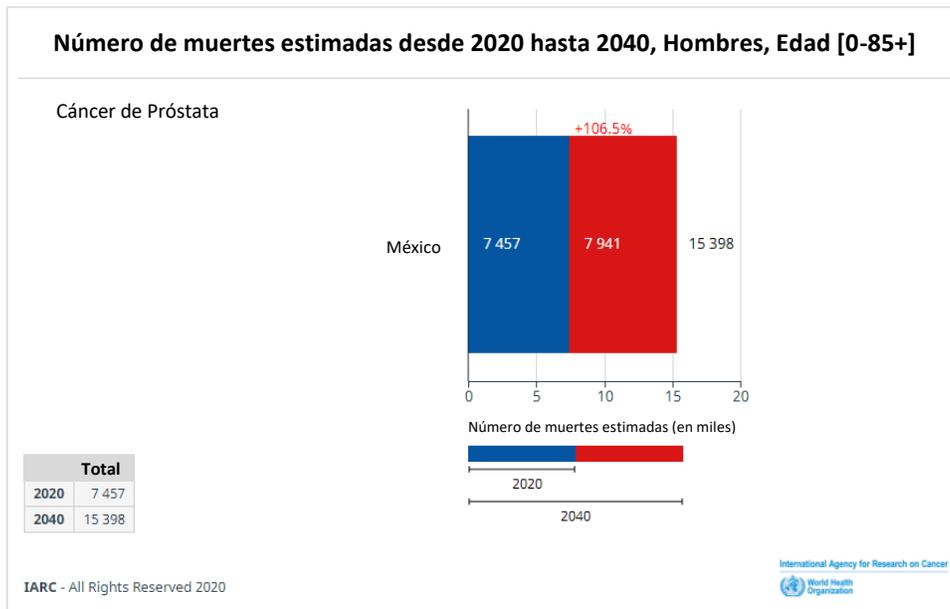


Figura 3. Número estimado de muertes por cáncer de próstata proyectado de 2020 a 2040. Modificado de: International Agency for Research on Cancer, 2019.

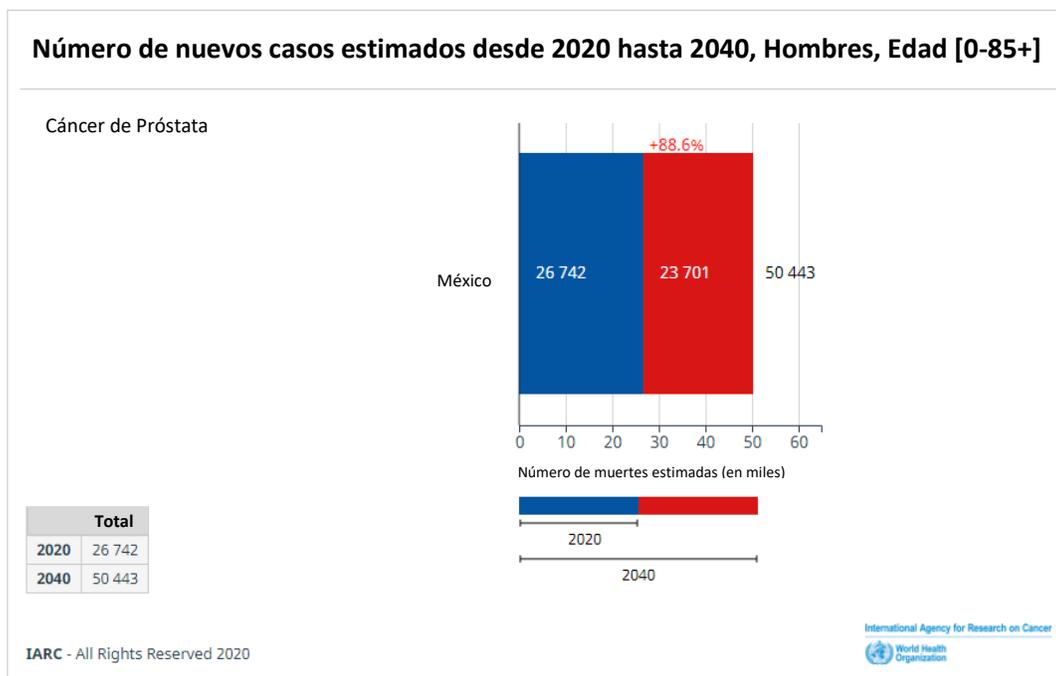


Figura 4. Número estimado de nuevos casos de cáncer de próstata proyectado de 2020 a 2040. Modificado de: International Agency for Research on Cancer, 2019.

Con lo anterior en mente, la cultura de prevención, además del diagnóstico eficiente y oportuno suponen grandes áreas de oportunidad en las cuales es fundamental la optimización e implementación de nuevos desarrollos tecnológicos.

La misión de este trabajo de tesis se centra en el desarrollo del conocimiento para generar un método de caracterización de alteraciones uro-prostáticas con el fin de crear una herramienta para identificación de posibles patologías.

Problemática

Aspecto social

Aproximadamente el 61% de la población en México reporta sintomatología prostática a partir de los 55 años, 25% sufre de daños obstructivos a los 75 años; y el 50% refiere una disminución de la fuerza y el calibre del chorro urinario. Los síntomas urinarios moderados son muy comunes en el hombre adulto, aproximadamente el 40% de los hombres mayores de 60 años y 20-30% de los hombres a partir de su quinta década de la vida presentan Síntomas del Tracto Urinario Inferior (STUI). (Delgado-Quiñones et al., 2015). El padecer problemas de este tipo, genera un impacto aversivo en la vida del hombre adulto puesto que interfiere con la vida diaria, genera preocupación, malestar y altera la percepción del estado de salud (Jalón Monzón et al., 2005).

Por otro lado, se tiene que desde 1990, la tasa de mortalidad del cáncer de próstata incrementa año con año (Figura 5). Esto genera un problema latente en la sociedad que merma las capacidades de esta, afectando en más de un ámbito.



Figura 5. Evolución de la tasa de mortalidad del cáncer de próstata en México. Fuente: Dirección General de Información en Salud, 2018; Secretaría de Salud, 2020.

Aspecto económico

En México no se cuenta con un estudio económico donde se delimite el costo que le genera a la sociedad el cáncer de próstata; sin embargo, en Holanda, Suecia, Canadá y los Estados Unidos se considera que el costo de esta enfermedad va del 5% al 6% del presupuesto derivado del sector salud para el tratamiento y manejo de todos los tipos de cáncer (Márquez Heine et al., 2005).

Debido a la ausencia de estudios del costo económico de este tipo de padecimientos se tiene una mala planeación de los sistemas de salud. Un estudio realizado en el Hospital General Dr. Manuel Gea González ubicado en la Ciudad de México (Márquez Heine et al., 2005) se centró en calcular el costo que genera tanto al paciente como al hospital el tratar con el cáncer de próstata (Figura 6).

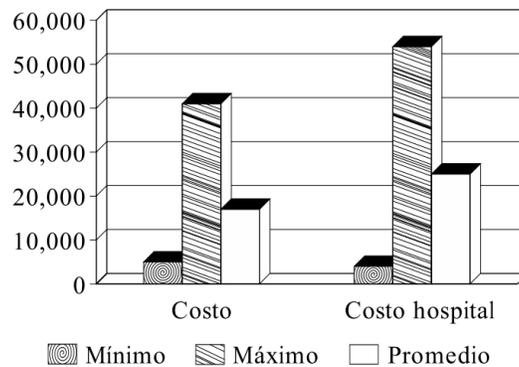


Figura 6. Costo económico anual del cáncer de próstata para el paciente y para el hospital en miles de pesos por paciente. Fuente: Márquez Heine et al., 2005.

El promedio de pacientes que se encuentran en hospitales similares al hospital general Dr. Manuel Gea González percibe entre menos de uno y ocho salarios mínimos mensuales. Considerando que el gasto total para la detección, manejo y control del cáncer de próstata equivale a 111% de un salario mínimo mensual promedio.

El costo del cáncer de próstata en nuestro país va cada día en aumento, así como el número de pacientes, además de que en nuestro país la falta de personal médico e instituciones ocasiona que los costos se tripliquen. Esto significa que cada día es menor el número de pacientes que se pueden costear el gasto de su enfermedad sin que esto ocasione un empobrecimiento del nivel de vida.

Aspecto tecnológico

La detección oportuna del cáncer de próstata es clave para un tratamiento exitoso, es por ello que la ciencia y la tecnología detrás de las técnicas y herramientas de detección se vuelven de gran relevancia para el cuidado de la salud.

El sector de salud público de nuestro país ofrece como métodos de diagnóstico más comunes el tacto rectal, la prueba del antígeno prostático específico, el ultrasonido rectal y la biopsia, siendo los más usados el tacto rectal y la prueba del antígeno prostático específico.

En algunas ocasiones, previo a los métodos de diagnóstico convencionales se realiza un cuestionario de sintomatología mediante el cual se determina la etapa de desarrollo del padecimiento y se decide qué acciones tomar con el paciente, sin embargo, la sintomatología es un concepto que se centra primordialmente en la subjetividad del paciente. Al ser necesaria su evaluación objetiva, es aquí donde reside la importancia de mejorar los instrumentos de evaluación existentes o desarrollar nuevos. Estos instrumentos deben cumplir unas propiedades de medición para ser utilizados con garantías y realizar mediciones válidas (capacidad del instrumento para medir lo que quiere medir), sensibles (capacidad para reflejar cambios reales en el atributo estudiado a lo largo del tiempo cuando las condiciones a medir han cambiado) y fiables (capacidad para medir un atributo de forma reproducible) (Jalón Monzón et al., 2005).

Los principales problemas con la tecnología actual para diagnóstico de enfermedades que afectan al tracto urinario inferior (hiperplasia prostática benigna, cáncer de próstata, etc.) radican en que algunas opciones llegan a ser costosas, invasivas, generan un bajo grado de aceptación por parte de los pacientes y en algunos casos llegan a ser poco fiables. Como casos puntuales se tiene al tacto rectal y a la prueba del antígeno prostático específico.

En 2013 López Chente-Casado et al. realizaron un estudio con los pacientes atendidos en la Jurisdicción Sanitaria Número 1 de Hermosillo, Sonora; para evaluar el valor clínico del tacto rectal y de la prueba del antígeno prostático específico. En

ella no observaron correlación entre el tacto rectal y el diagnóstico de cáncer de próstata que fue comprobado mediante biopsia. Puesto que la sensibilidad y especificidad del tacto rectal son influidas fuertemente por el nivel de entrenamiento y experiencia de los cuerpos médicos. Es lógico pensar, basados en los resultados, que no todas estas personas están correctamente calificadas. Esto indica que existe la necesidad de identificar estrategias para mejorar el entrenamiento de los cuerpos médicos que participan en la valoración clínica de los pacientes.

En cuanto a la prueba del antígeno prostático específico se tiene que dicho antígeno no es específico de cáncer de próstata, pues se eleva también en pacientes con prostatitis y en enfermos con hipertrofia benigna de próstata. Además, la manipulación prostática (masaje prostático, biopsias) o las relaciones sexuales pueden modificar en mayor o menor grado la concentración sérica del antígeno prostático específico (Molina et al., 2000).

Otro aspecto para considerar en el resultado de una prueba de antígeno prostático específico es el método utilizado, ya que existe variabilidad en los resultados en función de la técnica comercial. Esto es importante en el diagnóstico y seguimiento de un paciente, pues si es realizado en distintos laboratorios será difícil distinguir si las modificaciones son realmente debidas a patología prostática o a cambios en la metodología empleada.

De acuerdo a Molina et al., empleando sólo la prueba del antígeno prostático específico no se detectarán todos los tipos de cáncer prostático. El tacto rectal complementa al antígeno prostático específico, aunque su sensibilidad es inferior. Ambas técnicas en conjunto reportan una sensibilidad diagnóstica que oscila entre el 60% y el 90% empleando 4 ng/ml como valor superior de la normalidad para la prueba del antígeno.

Lo anterior demuestra que existen grandes áreas de oportunidad en las cuales es necesario trabajar para mejorar y desarrollar nueva tecnología de diagnóstico que ofrezca mayores beneficios a los pacientes.

Justificación de la investigación

Las enfermedades y padecimientos que causan afecciones uro-prostáticas reducen de manera significativa la calidad de vida y afectan, pero no se limitan a hombres de 45 años y más. Para el 2050 se tiene proyectado que este sector de la población mexicana al menos se duplicará (García-Guerrero, 2014), este crecimiento se traduce en una mayor incidencia de este tipo de enfermedades, lo cual representa un grave problema a futuro.

Se sabe que la detección oportuna es el primer paso clave para lograr un tratamiento efectivo. Es por ello que cobra gran importancia planear soluciones a problemas futuros a los que irremediamente se enfrentará la población.

Actualmente existen opiniones divididas en cuanto a la fiabilidad y efectividad de los métodos de diagnóstico más comunes para detección de enfermedades y padecimientos uro-prostáticos, lo cual es alarmante puesto que para 2025 la incidencia y mortalidad de enfermedades como el cáncer de próstata, aumentará de manera notable (Figuras 7 y 8) (International Agency for Research on Cancer, 2019).

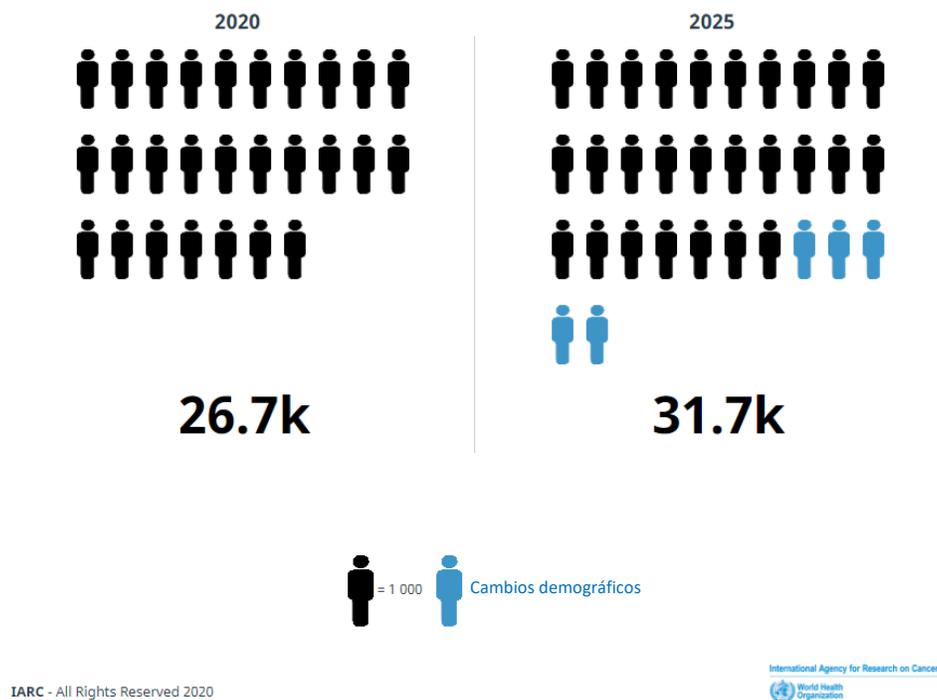


Figura 7. Proyección de la incidencia del cáncer de próstata al 2025. Modificado de: International Agency for Research on Cancer, 2019.

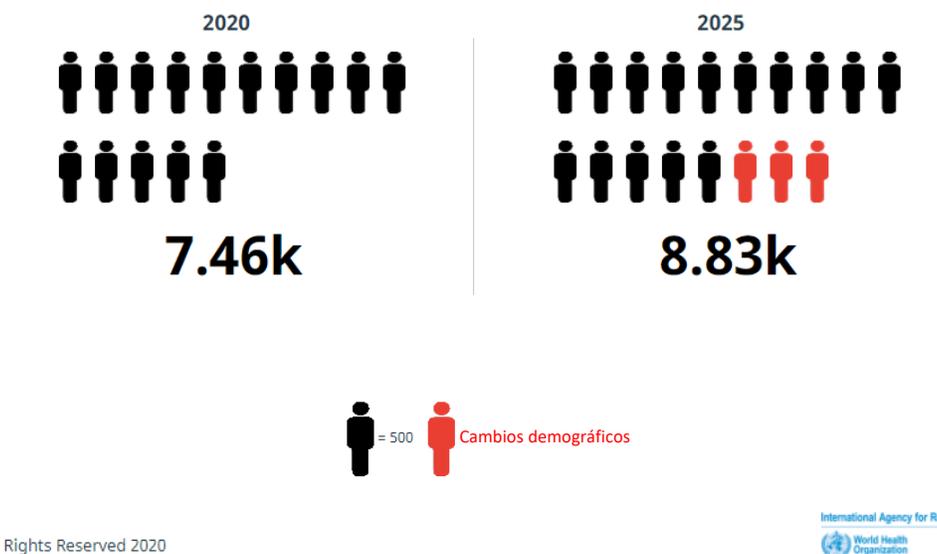


Figura 8. Proyección de la mortalidad por cáncer de próstata al 2025. Modificado de: International Agency for Research on Cancer, 2019.

El desarrollo de este proyecto se justifica al sentar bases para la construcción de una herramienta que complemente y/o mejore el diagnóstico de enfermedades y padecimientos uro-prostáticos.

Objetivos

General

Desarrollar el modelo matemático para caracterizar alteraciones uro-prostáticas mediante el análisis del perfil de onda medido en la orina, con el fin de generar una herramienta de diagnóstico.

Específicos

- ❖ Caracterizar el perfil de onda en un modelo anatómico sano.
- ❖ Caracterizar el perfil de onda en un modelo anatómico con alteraciones uro-prostáticas.
- ❖ Modelar matemáticamente el flujo de orina a través de una uretra obstruida.

Hipótesis

La reducción del diámetro del tracto urinario inferior causado por alteraciones uro-prostáticas modifica el perfil de onda medido en la orina.

Presentación del trabajo

En el primer capítulo de esta investigación se expone el problema que aborda este trabajo, descrito desde el punto de vista social, económico y tecnológico. Se muestran las razones que justifican su desarrollo y pertinencia, así como los objetivos que contempla y la hipótesis que fundamenta a este proyecto.

En el capítulo dos, se presenta una breve descripción anatómica de los principales órganos involucrados en el proceso de micción, se describen los tipos más comunes de alteraciones uro-prostáticas clasificadas de acuerdo con su origen (congénito, por trauma o por enfermedad) y se destacan las principales afecciones que estas causan. A lo largo del capítulo tres se describen y comparan las principales técnicas para la detección de enfermedades uro-prostáticas, resaltando sus principales beneficios y deficiencias.

El cuarto capítulo introduce a la teoría de ondas y a la mecánica de fluidos, en donde se explican los conceptos y fenómenos físicos de los cuales hace uso el modelo matemático. Para el quinto capítulo se describe la plataforma experimental y el diseño de experimento, adicionalmente el modelo matemático. En el capítulo seis

se exponen los resultados obtenidos al experimentar con el modelo anatómico y los modelos matemáticos. En el capítulo siete se expone la discusión de los resultados presentados y en el último capítulo se finaliza con las conclusiones obtenidas durante el desarrollo de este trabajo de investigación y se plantean actividades a futuro para expandirla.

Capítulo 2

Anatomía y alteraciones uro-prostáticas

Anatomía del aparato urogenital masculino

La anatomía del aparato urogenital masculino comprende un gran conjunto de órganos en estrecha relación los cuales, en términos médicos, se han clasificado en tres categorías: vías superiores, vías medias y vías inferiores. Para los fines de esta investigación, la atención se centrará en los órganos pertenecientes a las vías inferiores (Figura 9) que intervienen en el proceso de micción.

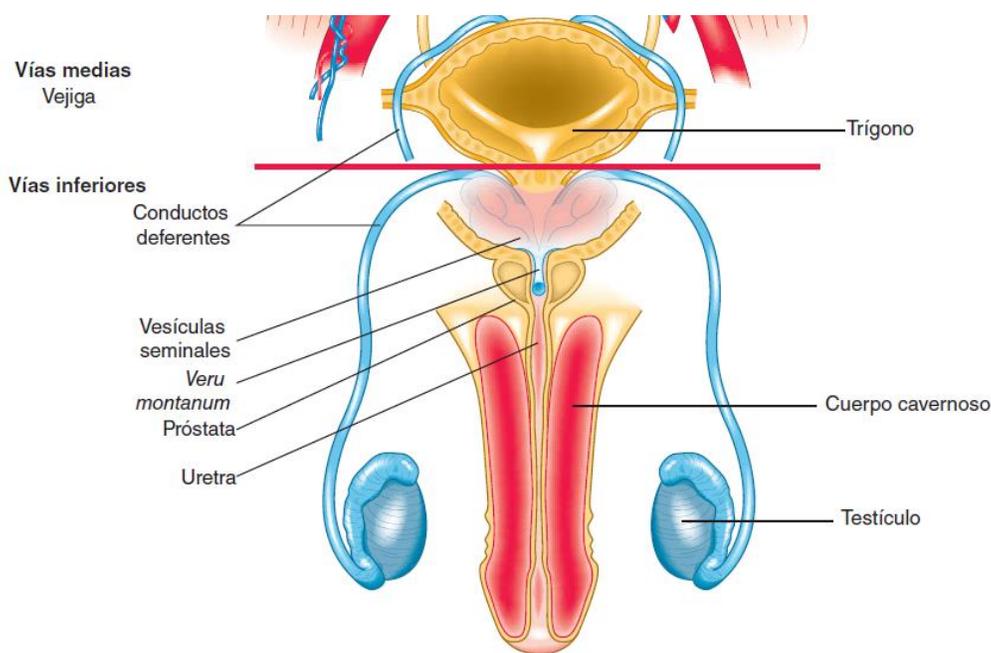


Figura 9. Vías medias e inferiores del aparato genitourinario masculino. Fuente: McAninch & Lue, 2014.

Vejiga

La vejiga es un órgano muscular (como el corazón) que está hueco y es aquí donde se almacena la orina. Para los adultos la vejiga tiene una capacidad aproximada de 400 a 500 ml. Así mismo, cuando la vejiga está vacía se encuentra debajo de la sínfisis del pubis. Para los lactantes y los niños, toma lugar más arriba (Berrocal et al., 2002). Cuando se llena se eleva por encima de la sínfisis y puede tocarse fácilmente.

Los uréteres entran en la vejiga desde la parte posterior de manera oblicua (Figura 10), manteniendo en estos puntos una separación de casi 5 cm. Los orificios que están en las extremidades del borde intraurético con forma de media luna que conforman el borde del trigono, tienen una separación de casi 2.5 cm (McAninch &

Lue, 2014). El trígono está ubicado en el área entre el borde y el cuello de la vejiga. El esfínter interno o cuello de la vejiga, no es un verdadero esfínter circular, sino que es un engrosamiento formado por fibras musculares entrelazadas del detrusor, las cuales se distienden para volverse la musculatura lisa de la uretra.

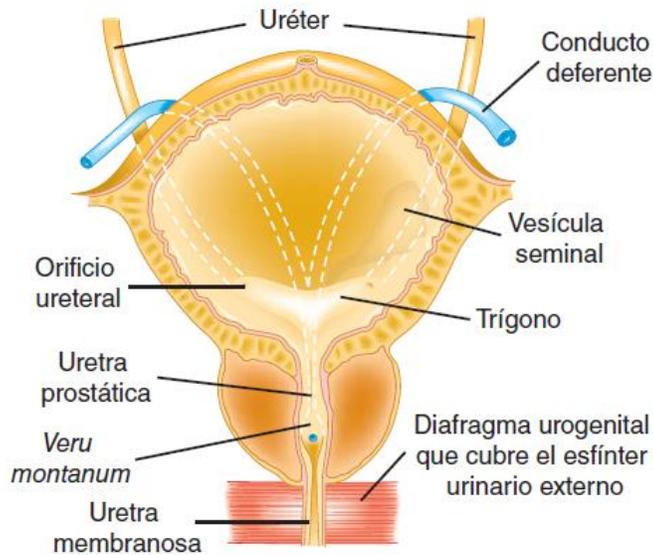


Figura 10. Esquema frontal de la vejiga. Fuente: McAninch & Lue, 2014.

En los hombres la vejiga está ubicada espacialmente en sentido posterior cerca de las vesículas seminales, los conductos deferentes, los uréteres y el recto

Próstata

La próstata es un órgano fibromuscular y glandular que se encuentra debajo de la vejiga (Figura 10). *“La próstata normal pesa casi 20 g y contiene la uretra posterior, que mide casi 2.5 cm de largo”* (McAninch & Lue, 2014). En la parte superior tiene soporte de los ligamentos puboprostáticos y en la parte inferior la sostiene el diafragma urogenital. La próstata está perforada en sentido posterior por los conductos eyaculadores, que la atraviesan en forma oblicua para vaciarse a través del *veru montanum* en la uretra prostática, cercana al esfínter urinario externo estriado.

Para fines clínicos se ha dividido a la próstata en cuatro zonas: periférica, central (rodea a los conductos eyaculadores), transicional (rodea a la uretra) y fibromuscular anterior (Figura 11).

El segmento de la uretra cubierto por la próstata es llamado uretra prostática. Está cubierto por una capa interna de músculo (una continuación de una capa similar a la de la pared de la vejiga). Dentro de la próstata, se incorpora una gran cantidad de músculos lisos, y estos músculos lisos provienen principalmente de los músculos externos a la vejiga. En sentido posterior, la próstata está separada del recto por dos capas membranosas denominadas fascia de Denonvilliers.

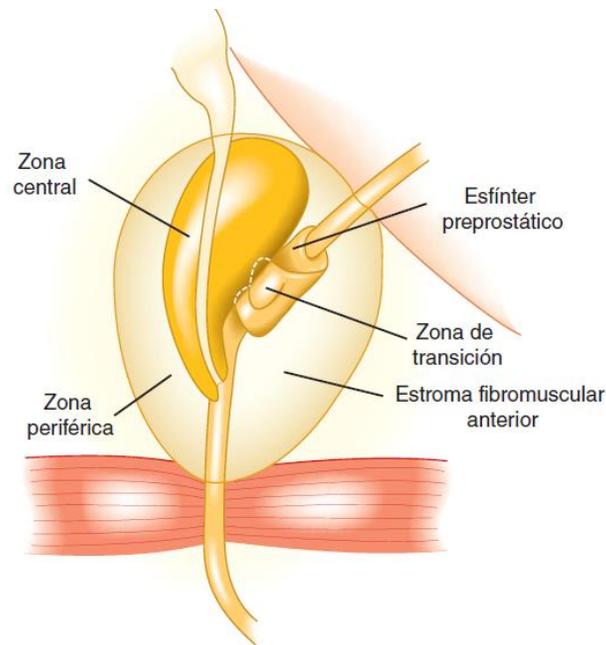


Figura 11. Zonas divisorias de la próstata. Fuente: McAninch & Lue, 2014.

La próstata está compuesta por una cápsula fibrosa delgada (debajo de ella hay fibras musculares orientadas en forma circular) y tejido de colagenoso que rodea la uretra (esfínter involuntario). Debajo de esta capa se encuentra el estroma prostático, compuesto de tejido conectivo y fibras musculares lisas en las que se encuentran las glándulas epiteliales. Estas glándulas drenan hacia los conductos excretores mayores, que se abren principalmente en la base de la uretra, entre el *veru montanum* (en los textos en inglés puede encontrarse como *verumontanum*) y el cuello vesical. Debajo del epitelio de transición de la uretra prostática hay glándulas alrededor de la uretra.

Uretra

La longitud de la uretra masculina es de unos 20 cm en promedio (Mangera et al., 2010) y en posición natural sigue la forma de una “S” alargada. Para su estudio anatómico se divide en dos partes, las cuales a su vez se subdividen en dos secciones (Figura 12):

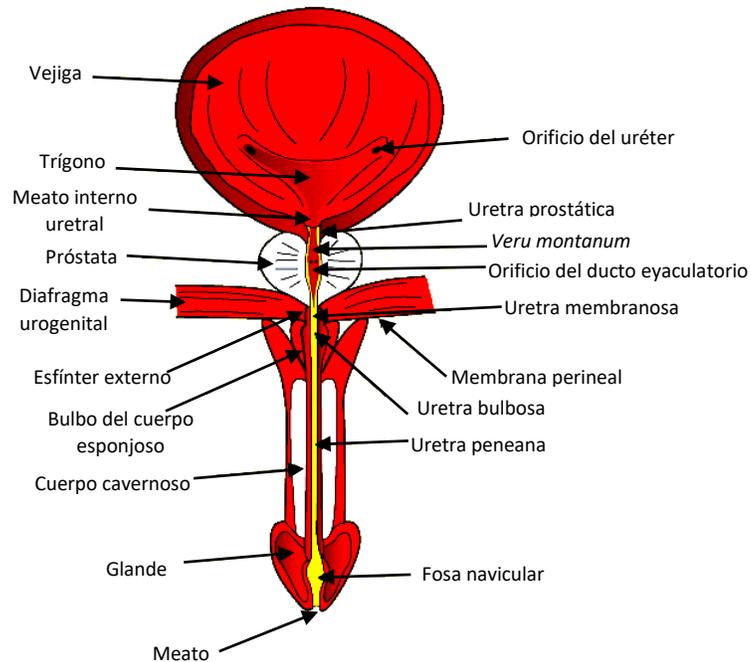


Figura 12. Esquema anatómico de la vejiga, próstata, uretra y pene. Modificado de: Mangera et al., 2010.

Uretra posterior

Esta es la parte con menor longitud y se subdivide en:

- Uretra prostática: Su longitud ronda entre los 3 y 4 cm en promedio, y atraviesa a la próstata.
- Uretra membranosa: Esta sección de la uretra es de aproximadamente 2 cm y se encuentra en el diafragma urogenital rodeada por el esfínter uretral estriado entre el final de la uretra prostática y la entrada al cuerpo esponjoso.

Uretra anterior

Esta es la parte más larga de la uretra con alrededor de 15 cm (Mangera et al., 2010) y está completamente rodeada por el cuerpo esponjoso, es por ello que también se le suele denominar uretra esponjosa. Esta parte se subdivide en:

- Uretra bulbosa: Al inicio del cuerpo esponjoso, la uretra se ensancha en forma de bulbo, es en este punto donde la uretra cambia su dirección vertical a horizontal.
- Uretra peneana o pendular: En la raíz del pene la uretra pasa a ser nombrada uretra peneana y cruza por el centro del cuerpo esponjoso del pene desembocando en el glande a través del meato urinario. Sin embargo, antes de desembocar la uretra se ensancha, a esta área se le denomina fosa navicular.

Pene

El pene se conforma por dos cuerpos cavernosos y el cuerpo esponjoso, en el cual se encuentra la uretra peneana (Figuras 12 y 13). El cuerpo esponjoso cubre casi desde la raíz del pene hasta el glande. Cada cuerpo está dentro de una fascia (red de tejido conectivo dispuesto en bandas) y está rodeado por una envoltura de fibra gruesa conocida como fascia de Buck. Los extremos del cuerpo cavernoso están unidos a los huesos pélvicos. Una cubierta de piel que no tiene grasa envuelve a estos cuerpos y forma un capuchón sobre el glande llamado prepucio.

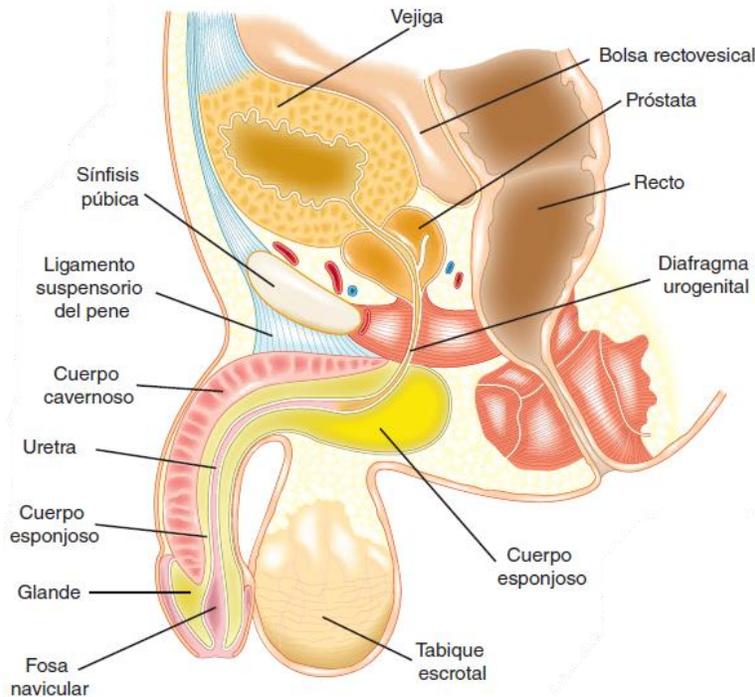


Figura 13. Aparato urogenital masculino. Fuente: McAninch & Lue, 2014.

El cuerpo esponjoso ocupa una depresión de su superficie ventral y está conectado a la superficie inferior del diafragma urogenital, de la que surge la uretra membranosa. Esta parte del cuerpo esponjoso está rodeada por el músculo bulboesponjoso. El ligamento suspensorio del pene surge de la sínfisis del pubis y se inserta en la cubierta de la fascia que cubre los cuerpos cavernosos.

Proceso de micción

Los riñones producen orina de manera constante, la cual se vacía en la vejiga mediante los meatos urinarios a través de un proceso de goteo llamado eyaculación de la orina. La orina se va acumulando de a poco en la vejiga hasta que se produce su vaciado también llamado micción.

La vejiga y la uretra están siempre coordinadas. Un doble sistema muscular regula la salida de la orina al exterior a través de la uretra, este está constituido por el cuello

vesical o esfínter interno y el esfínter externo. A medida que la vejiga se aproxima a su máxima capacidad de llenado denominado repleción, se genera un progresivo deseo miccional (Tresguerres et al., 2005).

Alteraciones uro-prostáticas

Se entenderá como alteración uro-prostática a las enfermedades y padecimientos que modifiquen a nivel morfológico el tracto urinario inferior alterando así el flujo de la orina, sin importar la naturaleza de estas. Se describirán con mayor detalle aquellas que sean más comunes.

Por enfermedad

Cáncer de próstata

El cáncer de próstata se origina cuando las células de la próstata comienzan a proliferar de manera descontrolada, llegando a formar masas tumorales en dicho órgano (Figura 14). Es en la zona periférica (Figura 11) en donde con mayor frecuencia se encuentran tumores malignos (Lippert, 2002).

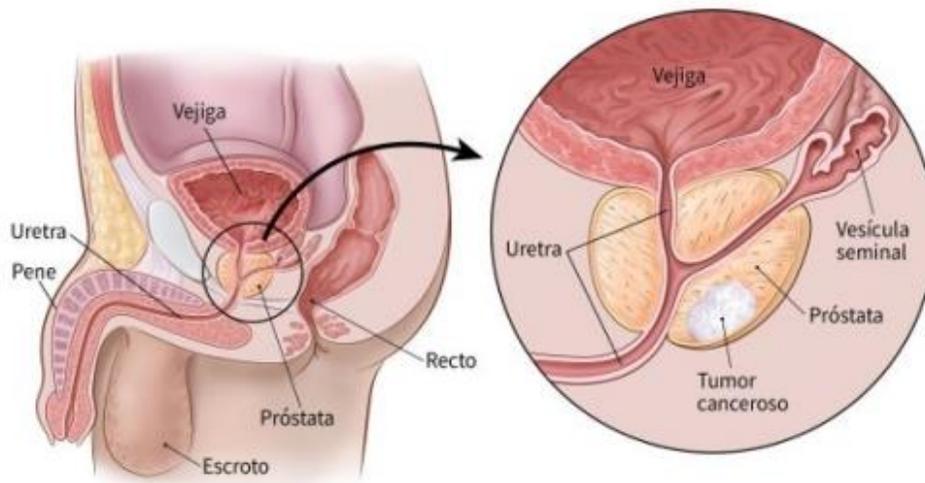


Figura 14. Aparato urogenital masculino (derecha) y formación de tumor en la próstata (izquierda). Fuente: American Cancer Society.

Casi todos los cánceres de próstata son adenocarcinomas (American Cancer Society, 2019). Estos cánceres se desarrollan a partir de las células glandulares que segregan el líquido prostático que se agrega al semen.

Otros tipos de cáncer que se pueden originar en la próstata son:

- Carcinomas de células pequeñas
- Tumores neuroendocrinos
- Carcinomas de células transicionales

- Sarcomas

Todos los hombres tienen riesgo de presentar cáncer de próstata, pero los hombres con ascendencia africana tienen más probabilidades de presentar este tipo de cáncer que otros hombres. El factor de riesgo más común es la edad, mientras más edad tenga el hombre, mayor será la probabilidad de que presente cáncer de próstata (Centers for Disease Control and Prevention, 2020).

Signos y síntomas

Los síntomas del cáncer de próstata son distintos para cada persona. Algunos hombres no llegan a presentar ningún síntoma, sin embargo, algunos de los síntomas más frecuentes son:

- Dificultad para comenzar a orinar.
- Flujo de orina débil o interrumpido.
- Micción frecuente, especialmente por la noche.
- Dificultad para vaciar la vejiga por completo.
- Dolor o ardor al orinar.
- Sangre en la orina o el semen.
- Dolor persistente en la espalda, las caderas o la pelvis.
- Dolor al eyacular.

Hiperplasia prostática benigna

Es una condición que afecta a los hombres en la cual la próstata aumenta sus dimensiones sin llegar a ser canceroso (Figura 15). La hiperplasia prostática benigna también suele ser nombrada hipertrofia benigna u obstrucción prostática benigna.

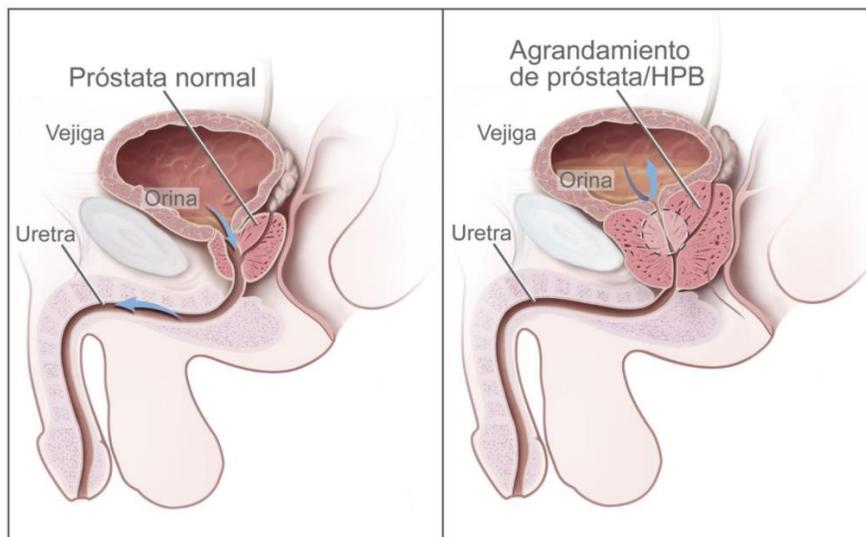


Figura 15. Próstata normal (izquierda) y próstata con hiperplasia benigna (derecha). Fuente: Instituto Nacional del Cáncer, 2019.

La próstata tiene dos periodos de crecimiento, el primero ocurre en la pubertad temprana, etapa en la cual la próstata dobla su tamaño. La segunda fase de crecimiento inicia alrededor de los 25 años y continúa creciendo durante la mayoría de la vida del hombre. La hiperplasia prostática benigna comúnmente se origina en algún punto de la segunda fase de crecimiento.

Conforme la próstata crece, dicha glándula presiona a la uretra. Eventualmente la vejiga puede debilitarse y perder la habilidad de vaciarse por completo, dejando algo de orina en ella. El estrechamiento de la uretra y la retención urinaria pueden llegar a causar problemas asociados a la hiperplasia prostática benigna.

Las causas que originan la hiperplasia prostática benigna aún no son del todo conocidas, pero se sabe que ocurre principalmente en los adultos mayores. Sin embargo, no se desarrolla en los hombres cuyos testículos fueron removidos antes de la pubertad (National Institute of Diabetes Digestive and Kidney Diseases, 2014a). Por esta razón se cree que algunos factores relativos al envejecimiento y a los testículos pueden causar hiperplasia prostática benigna.

Esta condición es el problema prostático más común en hombres mayores de 50 años. La hiperplasia prostática benigna rara vez causa afecciones a hombres menores de 40 años, sin embargo, se sabe que la ocurrencia de síntomas aumenta conforme la edad. Esta enfermedad afecta al rededor del 50% de los hombres entre los 51 y 60 años, y alrededor de un 90% a los hombres mayores de 80 años (National Institute of Diabetes Digestive and Kidney Diseases, 2014a).

Signos y síntomas

Síntomas en el tracto urinario inferior pueden sugerir hiperplasia prostática benigna, estos incluyen:

- Micción frecuente
- Incapacidad de retrasar la micción
- Problemas para comenzar a orinar
- Chorro de orina débil o intermitente
- Goteo al terminar de orina
- Nocturia
- Retención urinaria
- Incontinencia
- Dolor al eyacular o durante la micción
- Color u olor inusual en la orina

Prostatitis

Es una condición frecuentemente dolorosa que involucra la inflamación de la próstata y algunas veces el área alrededor de ella. Se han identificado cuatro tipos de prostatitis:

- Prostatitis crónica no bacteriana
- Prostatitis bacteriana aguda
- Prostatitis bacteriana crónica
- Prostatitis asintomática

Los hombres con prostatitis asintomática no presentan ningún síntoma, sin embargo, se puede diagnosticar cuando se realizan pruebas para desordenes en el tracto urinario. Este tipo de prostatitis no causa complicación alguna y no requiere ningún tratamiento (National Institute of Diabetes Digestive and Kidney Diseases, 2014b).

Las causas de la prostatitis difieren dependiendo de su tipo. Para la prostatitis crónica no bacteriana, su causa es desconocida. Sin embargo, puede estar relacionada a la presencia de químicos en la orina, a una respuesta del sistema inmune a alguna infección previa en el tracto urinario, o a daño en los nervios de la zona pélvica (National Institute of Diabetes Digestive and Kidney Diseases, 2014b).

Por otro lado, las prostatitis bacterianas aguda y crónica se deben a una infección bacteriana en la próstata. La prostatitis bacteriana aguda ocurre de forma repentina y dura poco tiempo, mientras que la crónica se desarrolla lentamente y dura un tiempo considerable, en algunas ocasiones hasta años. Estas infecciones pueden ocurrir cuando una bacteria viaja desde la uretra hasta la próstata.

La prostatitis es la afección al tracto urinario más común en hombres menores a 50 años, y la tercera afección más común en hombres mayores a 50 años (cáncer de próstata e hiperplasia prostática benigna son las primeras). El sistema de salud de Estados Unidos trata con alrededor de dos millones de casos de prostatitis bacteriana cada año (National Institute of Diabetes Digestive and Kidney Diseases, 2014b).

A pesar de lo anterior, la prostatitis crónica no bacteriana es la forma más común y menos entendida de las prostatitis. Esta puede llegar a afectar a cualquier grupo de edad.

Signos y síntomas

Para los distintos tipos de prostatitis existen síntomas en común y otros que se desarrollan en función del tipo de prostatitis, aunque pueden no ser iguales para todos los hombres.

Prostatitis crónica no bacteriana

Sus principales signos y síntomas pueden incluir dolor o molestias en una o más de las siguientes áreas:

- Entre el escroto y el ano
- Parte baja central del abdomen

- Pene
- Escroto
- Espalda baja

Otros síntomas incluyen:

- Dolor durante o después de la eyaculación
- Dolor en la uretra durante o después de la micción
- Dolor en el pene durante o después de la micción
- Micción frecuente
- Chorro de orina débil o intermitente

Prostatitis bacteriana aguda

Los síntomas de este tipo de prostatitis pueden aparecer repentinamente y ser severos, quien los padezca debe buscar atención médica inmediata. Los signos y síntomas incluyen:

- Micción frecuente
- Fiebre
- Resfriados
- Ardor o dolor al orinar
- Dolor en el área genital
- Nocturia
- Náuseas y vómitos
- Retención urinaria
- Problemas para comenzar a orinar
- Chorro débil o intermitente

Prostatitis bacteriana crónica

Estos síntomas son similares a los de la prostatitis bacteriana aguda, pero no tan severos. Este tipo de prostatitis se desarrolla en días. Los síntomas pueden ir y venir o ser leves todo el tiempo. Sus signos y síntomas incluyen:

- Micción frecuente
- Ardor o dolor al orinar
- Dolor en el área genital
- Nocturia
- Retención urinaria
- Problemas para comenzar a orinar
- Chorro débil o intermitente
- Dolor al eyacular

Uretritis

Es una inflamación de la uretra que comúnmente es causada por infecciones de transmisión sexual y con mucha menor frecuencia es resultado del daño causado por algún instrumento tal como un catéter urinario, o por la exposición a algún irritante químico tal como algún antiséptico o espermicida. Se ha clasificado a la uretritis debida a transmisión sexual en dos categorías: uretritis gonocócica, causada por la bacteria de la gonorrea; y la uretritis no gonocócica, causada por otros tipos de bacteria (Harvard Medical School, 2019). La uretritis gonocócica comúnmente llamada gonorrea es causada por la bacteria *neisseria gonorrhoeae*. Las infecciones por gonorrea son transmitidas mediante el acto sexual.

Por otro lado, la uretritis no gonocócica es causada por otras bacterias distintas de la *neisseria gonorrhoeae*, también transmitidas sexualmente. La más común es la bacteria *chlamydia trachomatis*. La uretritis no gonocócica es una de las infecciones por transmisión sexual más comunes.

Signos y síntomas

Los síntomas principales causados por uretritis son:

- Dolor o ardor al orinar
- Micción frecuente
- Enrojecimiento alrededor de la abertura de la uretra
- Secreciones amarillas

Estenosis uretral

La estrechez uretral o estenosis es el resultado de una afección al epitelio, (tejido que recubre al órgano) puede ser causada por enfermedad o de forma congénita. Los cambios más notables se producen en el tejido conectivo (situado debajo del epitelio), donde se observa una alteración en las fibras de colágeno (Velarde Ramos & Gomez Illanes, 2018).

Puede ser causada por cicatrices, las cuales tienen el efecto de obstruir el tracto urinario inferior (Figura 16). Esto afecta de gran manera la calidad de vida del paciente causando alteraciones durante la micción y en algunos casos puede dañar a todo el tracto urinario y/o causar falla de las funciones renales.

Este problema puede ocurrir a cualquier edad y es mucho más común en hombres que en mujeres. En los países industrializados se estima una tasa de incidencia del 0.9% (Tritschler et al., 2013).

Signos y síntomas

Los principales signos y síntomas son la obstrucción del flujo urinario, dolor al orinar, incremento del tiempo necesario para terminar de orinar, micción frecuente y la sensación de no haber vaciado por completo la vejiga.

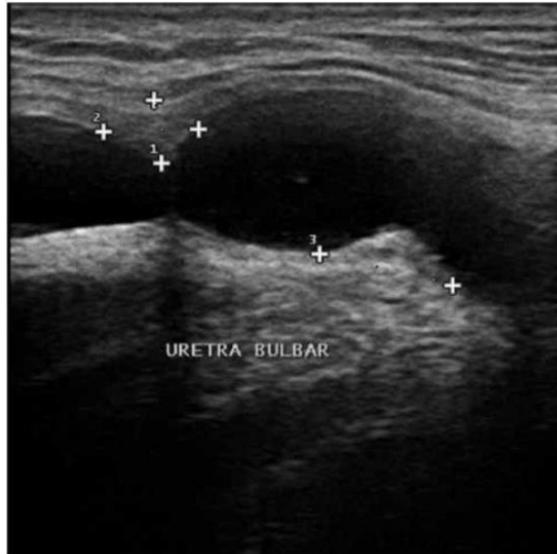


Figura 16. Imagen obtenida por ultrasonido de estenosis en la uretra bulbar. Fuente: Cruz García-Villa et al., 2013.

Cáncer de uretra

El cáncer de uretra se presenta cuando las células de este órgano se reproducen sin control, lo cual llega a general tumores (Figura 17). Este tipo de cáncer se da de forma más frecuente en hombres (Instituto Nacional del Cáncer, 2020b).

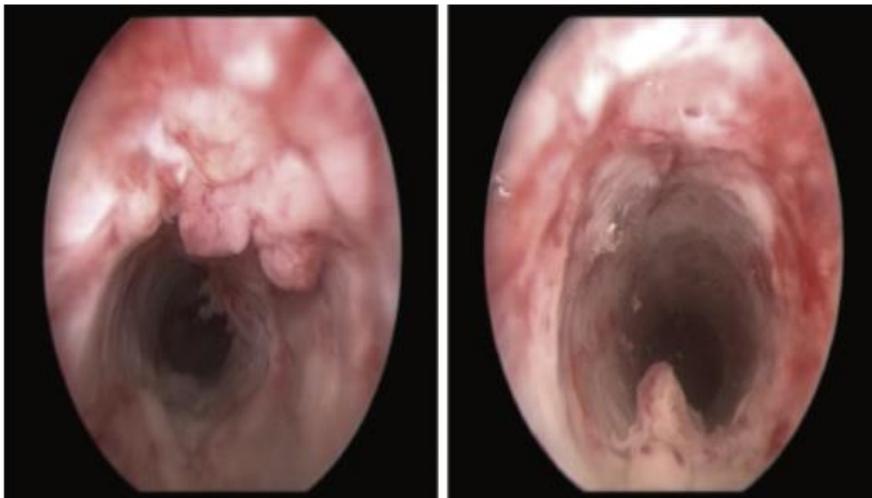


Figura 17. Formación de tumores uroteliales en la uretra. Fuente: Geavlete et al., 2016.

Existen distintos tipos del cáncer de uretra, estos dependen de qué grupo de células de este órgano comienzan a desarrollar tumores. Éstos se clasifican en:

- Carcinoma de células escamosas: Es el tipo más común. Se forma en las células del revestimiento de la uretra peneana.
- Carcinoma de células de transición: Se forma en la uretra prostática.
- Adenocarcinoma: Se forma en las glándulas que rodean la uretra.

El cáncer de uretra puede esparcirse (metástasis) a los tejidos que rodean la uretra y comúnmente se encuentra en los ganglios linfáticos cercanos en el momento del diagnóstico.

Signos y síntomas

Esta enfermedad puede no presentar molestia alguna en los estadios tempranos, sin embargo, en etapas más avanzadas puede causar:

- Nocturia.
- Dificultad para empezar a orinar.
- Flujo de la orina débil o intermitente.
- Micción frecuente.
- Incontinencia.
- Secreción de la uretra.
- Sangrado de la uretra.
- Un bulto o engrosamiento en el perineo o el pene.
- Un bulto o hinchazón en la ingle.

Cáncer de pene

En esta enfermedad, algunas células que forman los tejidos del pene proliferan descontroladamente hasta formar masas tumorales las cuales se clasifican en función del lugar donde se forma el tumor (Figura 18). El cáncer de pene tiene una tasa de incidencia muy baja en la mayoría de los países desarrollados (Instituto Nacional del Cáncer, 2020a).

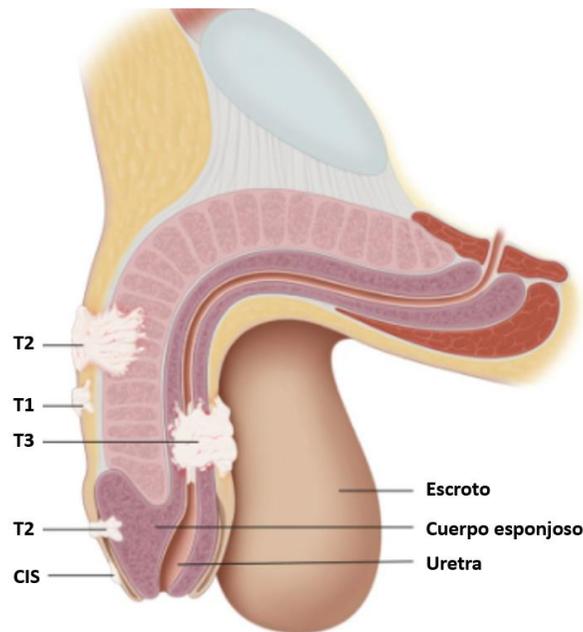


Figura 18. Clasificación de los tumores según en lugar donde se forman: T1 formación de cáncer en la capa más profunda de la piel, T2 formación del cáncer en el cuerpo esponjoso, T3 formación del cáncer en el cuerpo cavernoso, CIS carcinoma en la piel del pene. Modificado de: Patient Information, 2017.

Se piensa que la infección por el virus del papiloma humano puede llegar a aumentar el riesgo de cáncer de pene (Instituto Nacional del Cáncer, 2020a). Otros factores de riesgo para desarrollar cáncer de pene son los siguientes:

- Edad mayor de 60 años.
- Fimosis (afección por la que el prepucio del pene no se puede mover hacia atrás sobre el glande).
- Higiene personal inadecuada.
- Muchas parejas sexuales.
- Consumo de tabaco.

Signos y síntomas

Algunos de los signos y síntomas que pueden llegar a desarrollarse por el cáncer de pene son:

- Secreciones
- Enrojecimiento o irritación
- Llagas o úlceras en el pene.
- Bultos en el pene.

Por trauma

Lesiones uretrales

Las lesiones uretrales no ocurren con mucha frecuencia, pero son mucho más comunes en hombres que en mujeres, y normalmente son resultado de fracturas pélvicas. *“Varias partes de la uretra pueden lacerarse, cortarse en sentido transversal o experimentar contusiones”* (McAninch & Lue, 2014). Los tratamientos dependerán del tipo de laceración y del nivel de la lesión.

Lesiones de la uretra posterior

La uretra membranosa es la porción de la uretra posterior que se lesiona con más frecuencia. Cuando ocurren fracturas pélvicas por traumatismo, la uretra membranosa se rasga desde el ápice prostático hasta la unión prostatomembranosa. Es posible que la uretra se corte de manera transversal en la superficie interior de la uretra membranosa (McAninch & Lue, 2014).

Signos y síntomas

Los síntomas más comunes son dolor e incapacidad para orinar. El signo más importante de lesión uretral es la presencia de la sangre en el meato. *“En la exploración física se observan dolor suprapúbico a la palpación y presencia de fractura pélvica. Puede palparse un hematoma pélvico grande y en desarrollo.”*

Suelen notarse contusiones perineales o suprapúbicas. La exploración del recto puede revelar un hematoma pélvico grande con la próstata desplazada en sentido superior. Sin embargo, la exploración rectal puede llevar a confusiones, porque un hematoma pélvico tenso puede parecerse a la próstata a la palpación” (McAninch & Lue, 2014).

Lesiones en la uretra anterior

Las lesiones en la uretra anterior son comúnmente causadas por el uso de sillas de montar. Este tipo de accidentes puede causar laceraciones o contusiones.

Contusión

Una contusión en la uretra es un signo de lesión por golpe o aplastamiento sin causar que la uretra se rasgue. Los hematomas causados por contusión suelen resolverse sin muchas complicaciones.

Laceración

Una laceración en la pared de la uretra puede generar extravasación de la orina (la orina ya no es canalizada por la uretra debido a la ruptura de la pared y dicho fluido termina por ser esparcido a otros tejidos) pudiendo así extenderse al escroto, al pene y hasta la pared abdominal. Esto puede causar más afecciones como septicemia, infecciones o un serio estado de morbilidad.

Signos y síntomas

Suele haber hemorragia uretral, dolor y en ocasiones se puede presentar algún hematoma perineal masivo. Al orinar puede notarse extravasación, hay inflamación en el área y si se tarda mucho en recibir atención médica, puede desarrollarse una infección grave.

Lesiones del pene

La ruptura de la túnica albugínea del pene (fractura de pene) puede suceder durante las relaciones sexuales. Al presentarse estos casos, el paciente tiene dolor y hematomas en el pene. Esta lesión debe corregirse mediante cirugía.

La completa separación de la piel del pene puede ocurrir por lesiones debidas a accidentes relacionados con el uso de maquinaria. La eliminación del tejido muerto o dañado y el injerto de piel suelen ser suficientes para preservar el miembro. Las lesiones al pene sugieren posible daño en la uretra.

Congénitas

Las condiciones congénitas suelen ser casos muy raros que no ocurren siguiendo una norma general, debido a la gran cantidad de variables que cambian según el caso, en este apartado sólo serán descritas de forma breve.

Estenosis meatal

La estenosis meatal es una condición urológica común en neonatos (Wang, 2010). Se considera que este trastorno es secundario a dermatitis por amoníaco después de la circuncisión y produce meatitis irritativa prolongada. Esta condición puede generar dificultad para apuntar al orinar (chorro de la orina desviado o múltiples chorros), dolor al orinar y micción frecuente.

Apenia

Es la ausencia congénita de pene, condición que es en extremo rara. La uretra suele abrirse en el suelo pélvico o dentro del recto. A los pacientes con este trastorno debe considerárseles para ser asignados al género femenino (McAninch & Lue, 2014), hacerles una vaginoplastia y darles un tratamiento con estrógenos a medida que el niño se desarrolla.

Duplicación de la uretra

La duplicación de la uretra es un trastorno poco observado. Las estructuras extra pueden ser completas o incompletas. Se recomienda la separación quirúrgica de todas, excepto de una uretra completa.

Capítulo 3

Técnicas para detección de alteraciones uroprostáticas

Tacto rectal

“El tacto rectal consiste en una inspección visual de la piel perianal, palpación digital del recto, y evaluación de la función neuromuscular del perineo” (Traducido de: McFarlane, 1990).

Para comenzar el procedimiento es importante colocar al paciente en una posición adecuada para la revisión. Existen distintas posiciones establecidas en las cuales se busca que el médico tenga un buen ángulo de observación y el espacio de maniobra necesario.

Para la posición de litotomía el paciente se recuesta boca arriba con las piernas abiertas y las rodillas ligeramente flexionadas, descansando las pantorrillas en pedestales para mantener las piernas elevadas. Esta posición se aplica de manera más común a mujeres durante este procedimiento. La llamada posición de Sim, es usada cuando el paciente se siente muy adolorido o es incapaz de adoptar otras posiciones (McFarlane, 1990). En esta posición el paciente se recuesta sobre su lado izquierdo teniendo los glúteos cerca del examinador y flexiona levemente la rodilla derecha manteniéndola alineada con la cadera. En la posición proctológica lateral el paciente se recuesta sobre su lado izquierdo y flexiona totalmente sus rodillas, llevándolas a la altura del pecho.

La posición en que se realizará la prueba puede ser alguna distinta a las anteriores, una variante o cualquier otra que el médico considere que facilitará el trabajo.

El tacto rectal involucra inspección visual y palpación de la zona, sin embargo, una vez adoptada la posición, en el caso específico de un tacto rectal para revisión de la próstata, el médico utiliza un guante y lubricante en un dedo (comúnmente el índice) para luego introducirlo dentro del recto (Figura 19). A los pocos centímetros se aplicará presión en la pared del recto más cercana al abdomen para palpar la próstata.

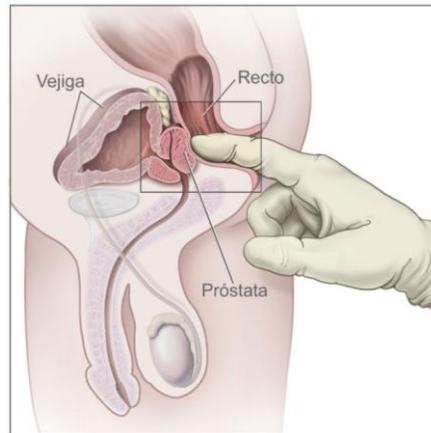


Figura 19. Tacto rectal. Fuente: Instituto Nacional del Cáncer, 2019.

Puesto que la próstata está separada del recto por dos capas de tejido suave (McAninch & Lue, 2014) que ceden con algo de presión, se puede tocar de forma indirecta a la próstata. Al llegar a este punto es importante examinar su tamaño, consistencia y buscar la presencia de nódulos en ella.

El examen del tacto rectal tiene las virtudes de ser rápido, práctico y de bajo costo. Sin embargo, la eficacia real de la técnica dependerá de la preparación y experiencia de quien realiza el examen. Para dar una idea de la fiabilidad de este examen, Alonso-Sandoica et al. realizaron un tamizaje de cáncer de próstata mediante tacto y comprobaron posteriormente mediante biopsia, el estudio arrojó como resultados una sensibilidad del 43,2% y una especificidad del 89,2%. Varios autores concuerdan en que el tacto rectal no es un método de diagnóstico sino una prueba que sirve para guiar el diagnóstico de algunos padecimientos (Alonso-Sandoica et al., 2006; Bobé-Armant, 2006; McFarlane, 1990).

Antígeno prostático específico

“El antígeno específico de la próstata es una proteína sintetizada en el tejido prostático. Su principal función es licuar el coágulo seminal y facilitar el transporte de los espermatozoides por los conductos deferentes hacia la uretra” (Bobé-Armant, 2006).

El análisis del antígeno prostático específico mide la concentración de éste en la sangre de un hombre. Para esto, se toma una muestra de la sangre del paciente y se envía a un laboratorio para ser analizada. Con este análisis se cuantifica la cantidad que hay de antígeno (en nanogramos) en cada mililitro de sangre. Se considera que hay sospecha de cáncer de próstata cuando el valor del antígeno en sangre se encuentra entre 4.1 y 20 ng/ml (Alonso-Sandoica et al., 2006); aunque este umbral puede modificarse ligeramente dependiendo del laboratorio médico que realice el análisis.

Actualmente existe controversia alrededor del uso de la prueba del antígeno prostático específico como método de diagnóstico (Adell et al., 2000; Alonso-Sandoica et al., 2006; Molina et al., 2000) e incluso hay grupos y organizaciones que no recomiendan su uso por los riesgos relativos al sobrediagnóstico (American Cancer Society, 2012; Siegel et al., 2019). La prueba del antígeno prostático específico es verdaderamente rápida y poco costosa, pero el problema radica en que esta proteína es específica de un órgano (la próstata) y no de un tumor; por lo cual el aumento de su nivel puede no estar relacionado con un cáncer. Los aumentos en la cantidad de antígeno en sangre pueden deberse a otras enfermedades (hiperplasia prostática benigna, infecciones, agrandamiento benigno de próstata, etc.) o a cuestiones tan simples como andar en bicicleta (Adell et al., 2000).

“La sensibilidad diagnóstica del PSA (siglas en inglés del antígeno prostático específico) varía según el estadio tumoral y la estrategia diagnóstica oscilando entre el 20% en los estadios A1 y el 98% en los estadios D2.” (Molina et al., 2000). Para mejorar su fiabilidad se han adoptado otras estrategias de análisis como el cociente del antígeno prostático específico libre sobre el total (relación PSA libre / PSA total).

El antígeno de la próstata puede encontrarse de forma libre, es decir no unido a otras proteínas, o unido a otras proteínas y moléculas. Se sabe que la cantidad de antígeno encontrado en su forma libre es más alta cuando hay una hiperplasia benigna prostática que cuando hay cáncer de próstata (Filella et al., 1997) es de esta manera que el resultado de la relación PSA libre/ PSA total será menor cuando pueda tratarse de un cáncer en la próstata.

Algunos concluyen que el uso del análisis del antígeno prostático específico es más pertinente para dar seguimiento a pacientes con cáncer de próstata luego del tratamiento (Adell et al., 2000) ya que su uso en el diagnóstico deja dudas en cuanto a su rendimiento debido a que cuando el nivel de antígeno es menor a 10 ng/ml está técnica puede presentar entre un 10% y un 30% de falsos positivos (Napal & Giral, 2015).

Uretrografía

Esta es una técnica de diagnóstico por imagen mediante la cual pueden ser detectadas algunas patologías benignas que afectan al tracto urinario inferior tales como hipospadias, roturas uretrales, fístulas uretrales, cálculos uretrales, entre otros (Gorriño et al., 2005). Se pueden destacar dos tipos de uretrografía, la retrógrada y la anterógrada también llamada cistouretrografía miccional. Ambas son usadas principalmente para el estudio morfológico y funcional de la uretra y la vejiga.

Previo al procedimiento el paciente tiene que ir a orinar para vaciar por completo la vejiga. Como preparación se procede a desinfectar el área de la fosa navicular ya que en esta zona se introducirá una sonda lubricada mediante la cual se inyectará paulatinamente algún tipo de solución de contraste yodado hidrosoluble; es en este

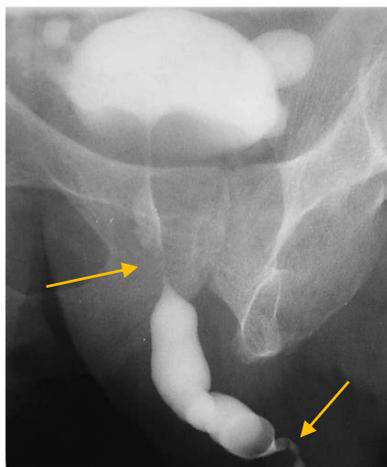
punto en donde comienzan a obtenerse imágenes mediante radiografía. La solución de contraste es inyectada hasta que la vejiga alcanza cierto volumen o hasta que el paciente indique que tiene ganas de orinar. También pueden obtenerse imágenes mientras el paciente desecha la solución de contraste.

Estas imágenes (Figura 20) se obtienen al hacer incidir un haz de rayos X sobre el área de interés. Para generar dichos rayos, se necesita de un tubo de rayos X que está al vacío, el cual tiene un filamento de metal que se calienta, aumentando el nivel de energía de los electrones del cátodo hasta que escapan de su orbital. Un campo magnético acelera a esos electrones, dotándolos de energía cinética mientras son focalizados por un campo eléctrico a un área específica del ánodo. Cuando los electrones chocan, parte de su energía se disipa en calor, la energía restante se convierte en radiación electromagnética; esto de acuerdo con las ecuaciones de Maxwell que nos indican que una carga acelerada irradiará energía electromagnética. De esta manera los choques constantes de electrones producen un espectro continuo de rayos X.

El haz de rayos X que penetra los tejidos del cuerpo, es absorbido de maneras distintas en función de la densidad de los fluidos y tejidos que hay en el cuerpo. Al salir el haz está atenuado y después incide sobre una película fotosensible que reacciona a la intensidad de la radiación recibida imprimiendo la imagen del área analizada

Esta técnica ofrece un alto grado de certeza clínica en cuanto al diagnóstico de padecimientos que afectan la morfología del tracto urinario inferior ya que se distingue con detalle la afección y su ubicación.

La duración de este procedimiento es de 20 minutos o más y puede causar molestias leves en el momento de insertar la sonda. En comparación con otras de las técnicas aquí mencionadas, esta es moderadamente costosa.



*Figura 20. Imagen obtenida de una uretrografía. Se puede observar una estenosis en la uretra prostática (flecha de arriba) causada por una hiperplasia prostática benigna, y una estenosis en la uretra peneana (flecha de abajo).
Modificada de: Gorriño et al., 2005.*

Estudios urodinámicos

Estos contemplan un conjunto de pruebas que permiten analizar el funcionamiento del tracto urinario inferior y diagnosticar anomalías como una disfunción miccional. Para ello se puede aplicar una o varias de las siguientes pruebas:

- Uroflujometría
- Cistometría
- Estudio de presión-flujo
- Medición de residuo postmiccional
- Videourodinamia
- Electromiografía esfinteriana

La uroflujometría mide la tasa de flujo del volumen del chorro de orina que es expulsado en cada segundo (ml/s). Esta es una prueba no invasiva ya que basta con medir el tiempo que dura la micción y pesar la orina para calcular su volumen, aunque también hay métodos más sofisticados. Cabe resaltar que no se pueden usar sólo los resultados de esta prueba para emitir un diagnóstico (Salazar & Castellanos, 2014). La medición del residuo postmiccional generalmente acompaña a la uroflujometría y puede hacerse de forma no invasiva a través de una ecografía.

Por otro lado, la cistometría analiza la fase del almacenamiento de orina en la vejiga y se hace uso de un procedimiento similar al de la uretrografía anterógrada. La sonda que se inserta también registrará los cambios de presión internos. La prueba electromiográfica suele hacerse a la par ya que consiste en medir la actividad muscular de la fase de almacenamiento.

En el estudio de presión-flujo se evalúa el comportamiento del tracto urinario inferior al momento de vaciar la vejiga. Mediante este estudio se puede determinar si hay obstrucción en el tracto urinario inferior o si se ha alterado el funcionamiento del detrusor.

Para la videourodinamia se toma una serie de imágenes consecutivas mientras se evalúa el funcionamiento del tracto urinario inferior. Estas imágenes son obtenidas mediante técnicas de fluoroscopia (similar a la uretrografía).

Este conjunto de pruebas son relativamente sencillas de aplicar, sin embargo, puede existir variabilidad de los resultados por la incorrecta estandarización de los procedimientos o de los equipos usados, es por ello que los resultados son dependientes del operador (Salazar & Castellanos, 2014).

Resonancia magnética

Este procedimiento proporciona una detallada imagen morfológica de alta resolución, que sirve de mapa y guía para dirigir la biopsia mediante ecografía transrectal. De este modo mejora considerablemente la detección y localización de un cáncer de próstata.

Esta técnica de detección no se limita a mostrar únicamente información morfológica como en el caso de la uretrografía, sino que también es capaz de aportar información metabólica, molecular y de vascularización. El tener estos datos en conjunto, además de localizar la lesión, permite distinguir el nivel de agresividad de un tumor (Vilanova et al., 2010).

Para realizar una resonancia magnética de próstata con el fin de localizar o detectar cáncer en dicho órgano, se requiere de una bobina multicanal en la pelvis, combinada con una bobina endorrectal. Esto hace el procedimiento más incómodo y costoso, pero ofrece mejores resultados. Antes de comenzar con el procedimiento se recomienda vaciar la vejiga debido a que el procedimiento requiere que el paciente permanezca sin moverse durante largos periodos ya que cualquier movimiento puede afectar la calidad de la imagen. En algunas ocasiones se administra un agente de contraste a base de gadolinio para mejorar la calidad de la imagen. Una vez colocada la bobina endorrectal, esta se infla alcanzando un volumen de 80 a 100 centímetros cúbicos. Luego de esto la máquina comienza su funcionamiento para la construcción de imágenes en donde el contraste observado en ellas representa diferentes propiedades de los tejidos (Figura 21).

Los equipos de resonancia magnética funcionan generando un potente y constante campo magnético, el cual al interactuar con el cuerpo humano genera el efecto conocido como resonancia magnética. Los tejidos que constituyen el cuerpo humano están formados por células y estas a su vez se componen fundamentalmente de átomos. El efecto de resonancia magnética ocurre sobre los protones de los núcleos atómicos de algunos elementos como el hidrógeno, el cual es bastante abundante en organismos biológicos ya que se encuentra en el agua y la grasa que los constituye.

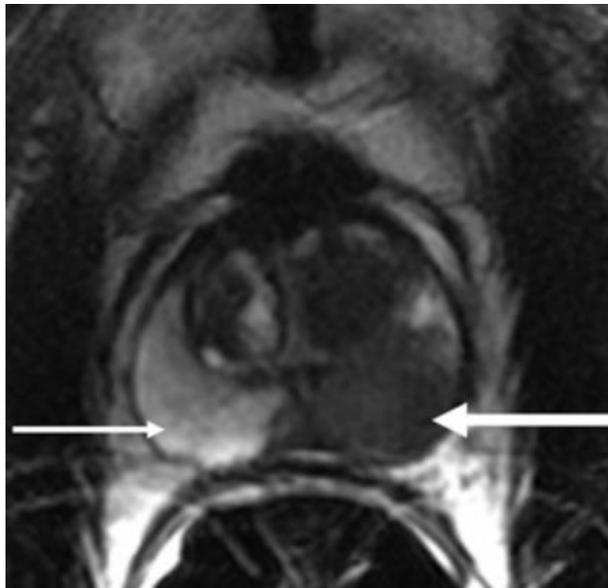


Figura 21. Corte axial de la próstata obtenido mediante resonancia magnética. Se puede observar tejido normal de la próstata (flecha delgada) y tejido de un carcinoma prostático (flecha gruesa). Fuente: Vilanova et al., 2010.

Cuando un campo magnético interactúa con los núcleos atómicos de algunos elementos, hace que el momento magnético de los protones de estos se alinee de forma paralela o antiparalela a la dirección del campo magnético, causando movimientos de precesión asíncronos entre los protones. La mayoría de los protones se alinearán de forma paralela ya que ésta es la correspondiente al estado de energía más bajo. Después se harán incidir pulsos de radiofrecuencia hasta llegar a la frecuencia de resonancia de los protones, es decir, la frecuencia a la que el movimiento de precesión de los protones se sincroniza y el spin absorbe energía lo cual cambia su estado. Esta frecuencia de resonancia es proporcional a la intensidad del campo magnético en el cual están inmersos los núcleos.

Al excitar al spin de los protones con el pulso de radiofrecuencia, los que estaban alineados de forma paralela cambiarán a la forma antiparalela. En respuesta al cambio, los protones tratarán de regresar al estado de energía más bajo. Al detener el pulso, habrá relajación en el spin de los protones y volverán al estado de energía bajo (alineación paralela) liberando la energía en forma de radiofrecuencia. Dichas cantidades de energía cambian en función de las propiedades de los distintos tejidos del cuerpo (National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering, 2019).

Para ubicar espacialmente el lugar del cual se emitió la energía se usan bobinas de gradiente dispuestas de manera ortogonal. Con estas se generan campos magnéticos con intensidades distintas para cada eje espacial. De esta forma la frecuencia de resonancia (dependiente de la intensidad del campo magnético) para cada plano espacial será distinta y por lo tanto la ubicación estará codificada en la radiofrecuencia que libera cada protón.

La energía que se libera en forma de radiofrecuencia es captada por antenas o bobinas receptoras en las cuales se induce una corriente, la cual es enviada a un transductor que envía la señal al *software* encargado de construir la imagen.

Los resultados obtenidos mediante resonancia magnética pueden ser certeros pero la realidad es que no es usada como técnica de diagnóstico primaria debido a su costo (elevado en comparación con las demás técnicas aquí mencionadas).

Ecografía transrectal

Esta es una técnica de diagnóstico por imagen que hace uso de ondas sonoras (ultrasonido). Se emplea comúnmente para análisis morfológico. En el caso de la próstata, mediante esta técnica se pueden obtener sus dimensiones y a partir de ellas estimar el volumen haciendo uso de la fórmula del elipsoide.

Como preparación para el procedimiento se pide realizar una dieta blanda con un día de anticipación. Unas horas antes del procedimiento se practicará un enema evacuante en el paciente. Para el procedimiento se le pide al paciente acostarse de lado con las piernas flexionadas y a la altura del pecho. Se pone una funda al aparato emisor de ultrasonidos llamado sonda de ecografía o transductor y este se

inserta en el recto hasta llegar al nivel de la próstata. Después la sonda comienza a emitir ondas sonoras de alta energía formando en tiempo real imágenes de la zona analizada (Figura 22).

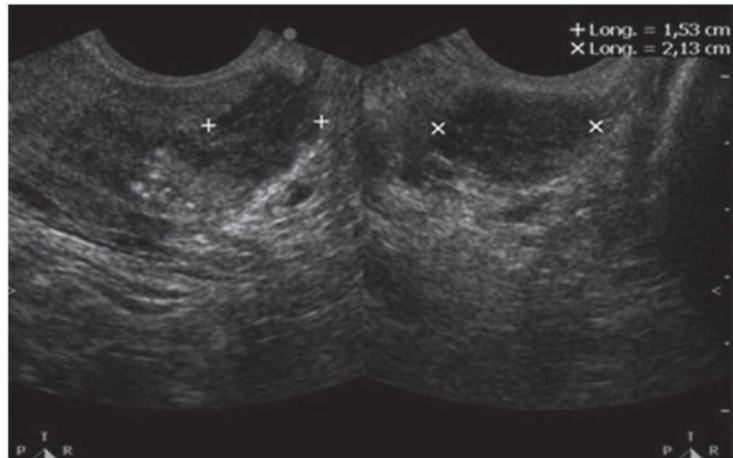


Figura 22. Imagen de una ecografía transrectal en la que se observan nódulos en la próstata de un paciente (espacio oscuro entre los puntos destacados con “+” y “x”). Fuente: Rodríguez et al., 2013.

Para formar las imágenes, se ajusta la frecuencia del transductor en función de la profundidad a la cual se desea llegar. Después, las ondas sonoras emitidas por el transductor se transmiten a través de los tejidos causando en ellos fenómenos de compresión y rarefacción. Dichas ondas sonoras son reflejadas por algunos tejidos causando ecos los cuales se transmiten con diferentes velocidades de propagación debido a la naturaleza mecánica de los tejidos (Díaz-Rodríguez et al., 2007). El transductor recibe estas señales en distintos tiempos y las transforma en impulsos eléctricos, los cuales serán visualizados en una pantalla.

La mayoría de los tumores presentan bajas capacidades de reflexión con respecto al tejido circundante, por lo cual podrán ser distinguidos en una ecografía como manchas más oscuras; sin embargo, no todas las áreas que presentan estas características tendrían un origen maligno (Rodríguez et al., 2013). Esto demuestra la baja especificidad de la ecografía transrectal para emitir un diagnóstico.

Tomografía por Emisión de Positrones y Tomografía Computarizada (TEP-TC)

Ambas son técnicas de estudio por imagen, las cuales en el diagnóstico de cáncer comúnmente se realizan a la par. La tomografía computarizada por sí sola obtiene imágenes detalladas de los órganos y tejidos mientras que la tomografía por emisión de positrones muestra la actividad normal o anormal de dichos órganos. En el caso del cáncer, el análisis mediante TEP-TC ayuda a describir su ubicación, si se ha diseminado y si está modificando la manera en que funcionan los órganos. Esta información es de suma importancia para ayudar a elegir el tratamiento adecuado o para estimar la probabilidad de recuperación.

Como preparación previa al tratamiento se puede solicitar al paciente no consumir alimentos por un periodo de 4 a 6 horas. Luego de esto, se inyecta al paciente vía intravenosa un marcador radiactivo el cual será transportado por el torrente sanguíneo y llegará a los órganos afines que serán analizados. Las células cancerosas tienden a absorber más del marcador radiactivo (Colmener et al., 2018); este proceso podrá tardar alrededor de una hora. Finalmente se pedirá al paciente que se recueste para comenzar con la toma de imágenes desde distintos ángulos.

La TEP se basa en el fenómeno de decaimiento radiactivo para obtener la información del funcionamiento de los órganos y tejidos, y así construir la imagen. El marcador que se le inyecta al paciente contiene isótopos radiactivos, es decir, núcleos que se encuentran inestables debido a que contienen gran cantidad de energía. Para librarse de dicha energía y llegar a un estado de equilibrio, los núcleos cambian su composición, a esto se le llama decaimiento radiactivo.

El núcleo inestable transforma algunos de sus protones en neutrones al emitir positrones los cuales son en esencia electrones con carga positiva, en otras palabras, la antipartícula del electrón. Los positrones son disparados de los núcleos inestables en rangos cortos cuya longitud depende de las características de los tejidos circundantes aunque normalmente es menor a un milímetro (National Research Council (US) and Institute of Medicine (US) Committee on the Mathematics and Physics of Emerging Dynamic Biomedical Imaging., 1996). En algún punto del trayecto, el positrón chocará con un electrón perteneciente a algún átomo de los tejidos del paciente. Al chocar el positrón y el electrón, se recombinan transformando su masa en energía (fenómeno de aniquilación) emitiendo dos fotones altamente cargados (rayos gamma) que salen disparados en direcciones contrarias formando un ángulo de 180° entre ellos.

Los rayos gama que salen del cuerpo son captados por detectores de centelleo dispuestos alrededor del paciente. Dichos detectores contienen cristales inorgánicos que emiten luz visible o ultravioleta durante un corto periodo (centelleo) al recibir fotones altamente cargados (rayos gamma). La luz emitida es proporcional a la energía del fotón incidente y es medida por un fotodetector, el cual manda la información al *software* encargado de construir la imagen.

Por otro lado, la TC se basa en la atenuación monocromática de los rayos X en objetos no homogéneos tales como el cuerpo humano. Para la generación de rayos X se usa un tubo de rayos X como se describió anteriormente.

Un equipo de TC monta el emisor de rayos X en un anillo helicoidal que envuelve al paciente. De esta manera el haz de rayos X puede apuntarse a cualquier sección del cuerpo. Al ser emitido el haz, incide sobre el cuerpo penetrando en él, con lo cual se enfrenta a distintos coeficientes de atenuación que varían según los tejidos.

Cuando el haz sale del cuerpo no tiene la misma energía con la que entró y este cambio o atenuación es medido por los detectores dispuestos en forma de anillo alrededor del paciente.

El emisor de rayos X rota alrededor del paciente para mapear la misma sección transversal desde varios ángulos. Al sobreponer la información recolectada desde cada ángulo, el *software* de imagen mapea la sección transversal de interés.

La diferencia fundamental entre el TEP y la TC es que la primera capta la radiación emitida desde el interior del cuerpo y la segunda construye las imágenes al hacer incidir radiación sobre el cuerpo.

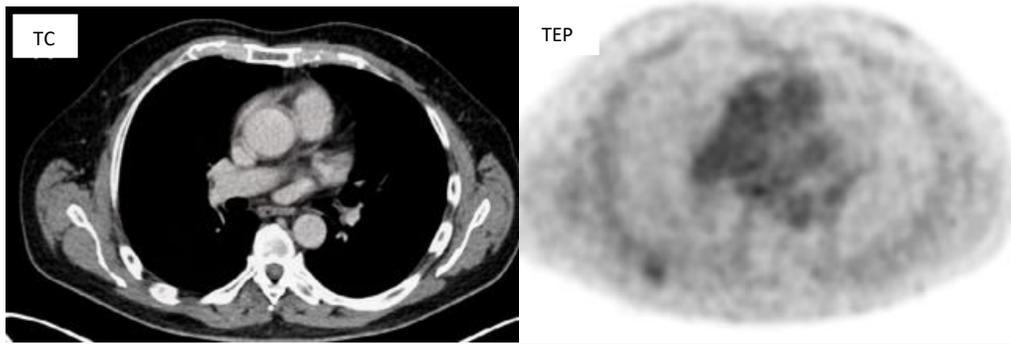


Figura 23. Imágenes de la próstata (al centro de cada imagen) de un paciente operado por cáncer de próstata. Fuente: Colmener et al., 2018.

Los resultados del TEP-TC son de gran relevancia para el diagnóstico y el seguimiento de cáncer, sin embargo, además de ser un procedimiento costoso, el equipo o los marcadores necesarios no están al alcance de todos los centros de salud.

Biopsia

La biopsia es una técnica empleada comúnmente para el diagnóstico de cáncer, ofreciendo un alto grado de certeza clínica. Sin embargo, no es una técnica de detección primaria. Es recomendable emplearla luego de que técnicas como las anteriormente mencionadas, arrojen los resultados necesarios para tener un alto grado de sospecha.

Centrándonos en el caso específico de los padecimientos uro-prostáticos, la biopsia es usada para diagnosticar cáncer de próstata, de uretra y de pene. En cada uno de estos casos, el análisis de las muestras de tejido sospechoso es en esencia igual; siendo diferenciadas por el procedimiento necesario para obtener el tejido.

De los anteriores, la próstata es el órgano de más difícil acceso; es por ello que la biopsia suele ayudarse de técnicas de imagen como la ecografía transrectal para ser guiada (Figura 24). Antes de comenzar con el procedimiento se realizan algunos análisis previos como el de orina y un coagulograma, además de que se administran medicamentos varias horas antes.

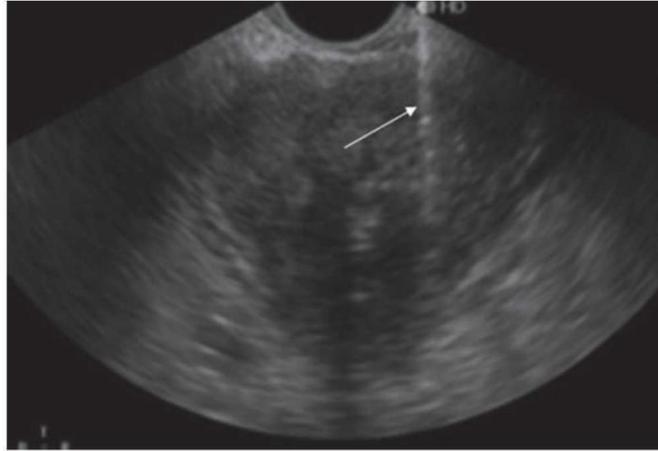


Figura 24. Imagen de una ecografía transrectal de la próstata. Con una flecha se señala la aguja insertada que obtendrá la muestra del tejido. Fuente: Rodríguez et al., 2013.

Para la intervención, se inicia midiendo las dimensiones de la próstata y ubicando las regiones sospechosas haciendo uso de la ecografía transrectal, luego se procede con la obtención del tejido mediante una aguja y un dispositivo de disparo con corte automático (Figura 25). Normalmente se toman varias muestras del tejido para su posterior análisis.



Figura 25. A la izquierda una aguja TRU-CUT 18GA (Pro Mag TM Angiotech) y a la derecha un dispositivo de disparo con corte automático. Fuente: Rodríguez et al., 2013.

Los tumores en el pene, aunque raros, son de más fácil acceso. Para obtener una muestra de estos hace falta intervención quirúrgica en donde se toman partes del tejido sospechoso.

Para obtener muestras de tejido de sospechoso en le uretra, se recurre a un procedimiento llamado cistoscopia uretral. Se utiliza un instrumento óptico llamado endoscopio, el cual es insertado por el meato urinario. A través de este instrumento puede observarse el interior de la uretra y con ello el tejido sospechoso del cual se toman algunas muestras para su posterior análisis.

Una vez obtenidas las muestras, estas son cortadas en láminas delgadas, se tiñen y se analizan bajo el microscopio para obtener un informe de patología. Con él se puede diagnosticar el tipo de tumor o de cáncer y en qué grado se encuentra (Instituto Nacional del Cáncer, 2010).

A pesar del alto grado de certeza clínica, la biopsia cuenta con inconvenientes tales como el ser un procedimiento invasivo y las posibles complicaciones que pueden ocurrir luego de la intervención (dolor intolerable, sangrado profuso y abundante, fiebre o retención aguda de orina) (Rodríguez et al., 2013).

A continuación, se comparan las técnicas de detección mostradas en este capítulo (Tabla 2) comparando aspectos relevantes para una técnica de diagnóstico.

Técnica de detección	Sensibilidad	Especificidad	Incomodidad	Posibles complicaciones	Costo aproximado
Tacto rectal	Aproximada de 43,2% ¹ para cáncer de próstata	Aproximada de 89,2% ¹ para cáncer de próstata	Está técnica es sumamente invasiva y causa incomodidad en los pacientes	El procedimiento puede ser doloroso si se presenta estenosis o laceraciones en el recto	10 USD
Prueba del antígeno prostático específico	Varía según el estadio tumoral del cáncer de próstata. 20% - 98% ²	93.6% ³ para cáncer de próstata	Leve y momentánea al tomar la muestra de sangre.	Ninguna	13 USD
Uretrografía	86.6% ⁴ para estenosis uretral	94.6% ⁴ para estenosis uretral	Incómodo e invasivo al inyectar el medio de contraste	Reacción aversiva al medio de contraste o lesión en uretra por inserción de sonda. Daños por radiación	105 USD
Estudios urodinámicos	Sensibilidad general para incontinencia 85% - 90% ⁵	Especificidad general para incontinencia 93% - 100% ⁶	Algunas pruebas son invasivas e incómodas	Lesiones en uretra y vejiga	100 a 350 USD dependiendo de las pruebas realizadas
Resonancia magnética	Varía según el estadio tumoral del cáncer de próstata. 38% - 93% ⁷	Dependiendo las técnicas y equipo empleado. 83% - 99.1% ⁷	Incómoda al usar bobina endorrectal	Reacción aversiva al medio de contraste si es que se administra	180 USD
Ecografía transrectal	62.57% ⁸ para cáncer de próstata	94.2% ⁸ para cáncer de próstata	Incómoda debido a la inserción de la sonda en el recto	Poco riesgo de sufrir complicaciones	75 USD
TEP-TC	Usando 68Ga-PSMA como marcador 80% ⁹	Usando 68Ga-PSMA como marcador 97% ⁹	Leve pues el paciente debe permanecer quieto hasta un par de horas	Reacción aversiva al marcador o al medio de contraste si es que se administra. Daño por radiación	4600 USD
Biopsia	En biopsia por sextantes 60% ¹⁰	En biopsia por sextantes 100% ¹⁰	Incómoda e invasiva por el uso de la sonda y la aguja	Hemospermia, hematuria, rectorragia, retención urinaria, epididimitis.	225 USD

Tabla 1. Comparación de las técnicas de detección mostradas en el Capítulo 3. Fuentes: 1 (Alonso-Sandoica et al., 2006), 2 (Molina et al., 2000), 3 (Ankerst & Thompson, 2006), 4 (Shahsavari et al., 2017), 5 (Colli et al., 2003), 6 (Swift & Ostergard, 1995), 7 (Harvey & deSouza, 2016), 8 (Maričić et al., 2010), 9 (Perera et al., 2016), 10 (Terris, 1999).

Capítulo 4

Conceptos fundamentales de ondas y mecánica de fluidos

En el proceso de micción, los músculos de la vejiga se coordinan con los del esfínter interno y externo para así liberar la orina almacenada. Ésta fluye a través de la uretra para finalmente salir expulsada por el meato urinario. Para que este proceso se desarrolle, distintos fenómenos físicos intervienen en él. El objetivo de este capítulo es mostrar los conceptos básicos e ideas clave en los cuales se basa el desarrollo del modelo matemático.

La orina es un fluido que obedece la ley de Hooke, es decir, es un medio elástico y cómo tal, a través de él se propagan perturbaciones. De manera natural, éstas pueden darse como respuesta a la presión que ejercen los músculos abdominales sobre la vejiga o a la presión que ejercen los esfínteres en el conducto de la uretra.

Cuando la vejiga está cerca de su límite de capacidad, es fácilmente palpable en la parte baja del abdomen, lo cual la hace susceptible a perturbaciones externas de distintos tipos. Para esta investigación es de especial interés el estudio del movimiento mecánico ondulatorio en la orina, producido por perturbaciones periódicas que inciden sobre la vejiga.

Ondas

Ondas mecánicas

Las ondas mecánicas son el resultado de la perturbación de un medio material. Dicha perturbación se propaga a lo largo del medio, transportando energía sin llegar a transportar materia. Para la propagación de ondas mecánicas se necesita de una fuente que genere perturbaciones, un medio que pueda ser perturbado y alguna propiedad física que permita que los elementos del medio influyan unos sobre otros.

Una forma de clasificar las ondas mecánicas es en función de la relación entre la dirección de vibración de las partículas y la dirección de propagación de la onda, siendo las opciones: ondas transversales y ondas longitudinales.

Ondas transversales

En las ondas transversales, el movimiento de las partículas se da de forma perpendicular a la dirección de propagación de la onda. El ejemplo clásico pero ilustrativo de este tipo de ondas es el movimiento sinusoidal que se forma en una cuerda cuando ésta es sacudida de arriba hacia abajo (Figura 26). Los distintos tramos de la cuerda oscilan alrededor de su posición de equilibrio formando crestas (tramo de cuerda por encima de la posición de equilibrio) y valles (tramo de cuerda por debajo de la posición de equilibrio). A la distancia que hay entre la posición de

equilibrio y el punto más lejano de una cresta o un valle se le denomina amplitud de onda (A).

Conforme se sigue perturbando a la cuerda, se forman patrones repetitivos de crestas y valles denominados ciclos; en donde la distancia que existe entre crestas contiguas, entre valles contiguos, o en esencia, entre puntos contiguos que están en fase, es llamada longitud de onda (λ).

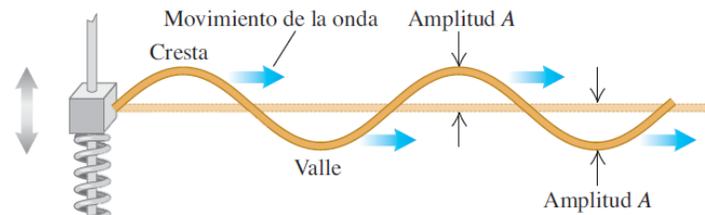


Figura 26. Onda transversal propagándose a lo largo de una cuerda. Fuente: Young & Freedman, 2009.

Otros aspectos básicos que caracterizan a una onda son: la frecuencia (f) que es la cantidad de ciclos que se forman en un segundo, el periodo (T) que representa el tiempo que tarda en completarse un ciclo, el número de onda angular (k) es la cantidad de ciclos que se forman en 2π radianes, la frecuencia angular (ω) el cambio en el ángulo por unidad de tiempo en un sistema oscilante y la rapidez con la que se propaga la onda (v).

Ondas longitudinales

Para las ondas longitudinales, el movimiento de las partículas se da de forma paralela a la dirección de propagación de la onda. Para conceptualizarlo se da el ejemplo de un tubo lleno de agua, la cual es perturbada por un émbolo (Figura 27).

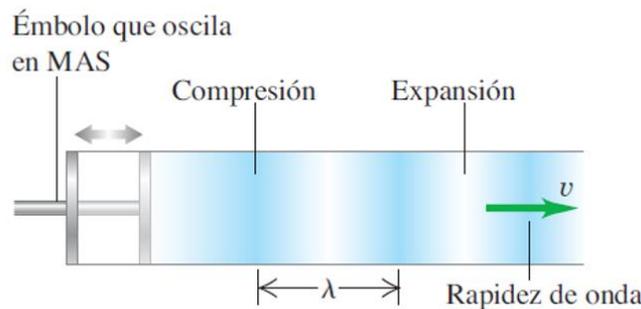


Figura 27. Onda longitudinal que se propaga en un tubo lleno de agua. MAS son las siglas de Movimiento Armónico Simple. Fuente: Young & Freedman, 2009.

Cuando el émbolo interactúa con el tubo lleno de agua, crea un frente de presión u onda que comprime un volumen de las partículas que constituyen el agua. El frente de presión se propaga por el fluido aglomerando las partículas (compresión) y posteriormente separándolas (expansión o rarefacción). Así las partículas oscilan en el mismo sentido que en el que se propaga la onda.

Al analizar estos tipos de onda, se puede observar que el modelo más afín al proceso de micción es el de ondas longitudinales debido a que la uretra hace las veces del tubo mencionado en el ejemplo y la orina se comporta de manera similar al agua. Por estas razones, las ondas longitudinales son de especial interés para el desarrollo de este proyecto de investigación.

Función de onda

Para el estudio y comprensión de cualquier fenómeno es importante el desarrollo de modelos de análisis que ayuden a anticiparlo y controlarlo en situaciones específicas. Para el caso particular de las ondas, dicho modelo se centra en la descripción de una onda ideal, la cual entra en esta categoría al considerarse de una sola frecuencia y que es infinitamente larga. Cuando la perturbación que causa la onda es provocada por un movimiento armónico simple, se utilizan una onda sinusoidal para su modelo ya que es el caso más simple de una onda periódica continua y a partir de ella se pueden construir ondas más complejas.

Como se mencionó anteriormente, una onda puede describirse en términos de su amplitud, longitud de onda, frecuencia, periodo, etcétera; sin embargo, resulta más eficiente determinar la posición de alguna de las partículas del medio en un tiempo determinado, ya que a partir de esta información pueden obtenerse todas las características de la onda. Teniendo en cuenta lo anterior, el modelo de la onda depende tanto de la posición espacial de una partícula como del tiempo en que se mide en dicha posición.

Para el planteamiento del modelo se considera una onda senoidal que se propaga hacia la derecha. Si dicha onda se posiciona en un sistema de coordenadas, la dirección de avance se sitúa en el eje positivo de las x y en el eje y se miden las distintas amplitudes de la onda. Cada partícula de la onda oscila en movimiento armónico simple con la misma amplitud y frecuencia, pero las oscilaciones de partículas en diferentes puntos de la onda (a lo largo del eje x) no están todas coordinadas, de hecho, los movimientos cíclicos de diversos puntos de la onda están desfasados entre sí en diversas fracciones de un ciclo. A esto se le denomina diferencia de fase, y por lo tanto se puede decir que la fase del movimiento es diferente para diferentes puntos.

Para medir el desplazamiento de una partícula de la onda, es necesario situarse en una posición espacial determinada como el origen del plano cartesiano (es decir $x = 0$), de esta manera se pueden determinar los distintos desplazamientos de la partícula (y) a lo largo del tiempo usando la ecuación:

$$y(0, t) = A \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi}{T} t \right) \quad (1)$$

La Ecuación 1, contempla un caso particular en el que se describe el movimiento de una sola partícula (la que está en $x = 0$), para incluir el movimiento que describe

cualquier otra partícula es necesario agregar un desfase extra en el argumento del seno, el cual se relaciona con la posición espacial en la onda (a lo largo del eje x)

$$y(x, t) = A \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi}{T} t - \frac{2\pi}{\lambda} x \right) \quad (2)$$

La diferencia en el argumento del seno de la Ecuación 2, denota que se analiza cada partícula en el sentido de avance positivo en el eje x . Esta expresión puede ser simplificada (Ecuación 3) haciendo uso de la frecuencia angular ($\omega = 2\pi/T$) y el número de onda ($k = 2\pi/\lambda$):

$$y(x, t) = A \operatorname{sen}(\omega t - kx) \quad (3)$$

Las ecuaciones anteriores representan el modelo de análisis de la onda, también llamando función de onda. La función de onda puede tomar distintas formas dependiendo del problema en cuestión que se desee abordar. Es importante resaltar que el concepto de función de onda aplica para ondas transversales y longitudinales.

Interferencia

Para el planteamiento de la función de onda, se considera una onda ideal, la cual es infinitamente larga y tiene una sola frecuencia. En la realidad, las ondas no son infinitamente largas puesto que los medios en las que se propagan son finitos, además de que la energía que transporta la onda va disipándose gradualmente.

Al estar una onda contenida en un medio finito, esta puede chocar con las fronteras del medio u otros obstáculos, y verse reflejada total o parcialmente. La onda reflejada avanza en sentido contrario a la onda original hasta que coincidan en la misma región espacial, es decir, hasta que se traslapen. Al efecto resultante del traslape de dos o más ondas se le denomina interferencia.

La interferencia se clasifica en dos tipos: constructiva y destructiva. La primera se presenta cuando las ondas se combinan sumando sus amplitudes y la segunda se da cuando al combinarse, las amplitudes se restan (Figura 28).

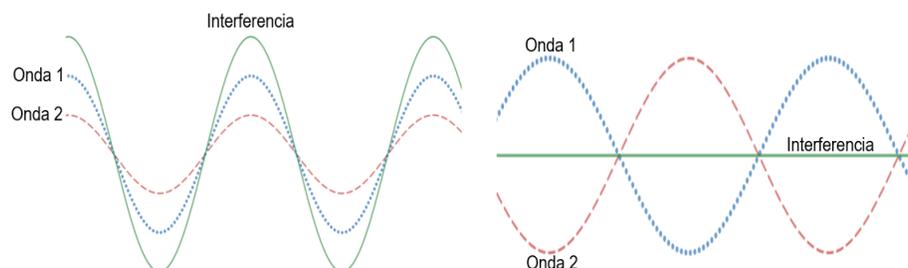


Figura 28. Traslape de ondas causando interferencia constructiva (imagen izquierda) y destructiva (imagen derecha).

Principio de superposición

De manera natural los sistemas biológicos y de otros tipos se encuentran bajo la constante influencia de diferentes de perturbaciones, las cuales generan ondas que se combinan entre sí para formar otra onda que puede llegar a ser muy distinta de las originales.

Para analizar matemáticamente esta situación, se recurre a la función de onda de cada una de las ondas originales. Al generarse las ondas en un medio que es elástico, estas se pueden combinar linealmente (Ecuación 4).

$$y(x, t) = y_1(x, t) + y_2(x, t) + \dots y_n(x, t) \quad (4)$$

A esta propiedad se le llama principio de superposición y en esencia, se trata de un conjunto de interferencias constructivas y destructivas entre las ondas para dar forma a un nuevo patrón.

Resonancia

Muchos sistemas mecánicos tienen comúnmente un modo normal de oscilación, es decir, un patrón específico para el movimiento de sus partículas o componentes que lo constituyen. Dicho modo cuenta también con una frecuencia específica.

Al aplicar una fuerza externa periódica a un sistema que puede oscilar, se induce una oscilación forzada que está obligada a oscilar a la misma frecuencia de la fuerza externa. De esta manera se ejerce cierto control sobre el comportamiento del sistema.

Al variar la frecuencia de la fuerza externa y acercarla a la frecuencia del modo normal, se desata un fenómeno conocido como resonancia, en el cual se da un incremento considerable en la amplitud de la oscilación del sistema causando perjuicios o beneficios según la aplicación que se le dé al sistema. La explicación para oscilaciones de gran amplitud en la frecuencia de resonancia es que la energía se transfiere al sistema bajo las condiciones más favorables.

En el contexto de ondas, el problema que se tiene como objeto de estudio es el análisis del comportamiento de las ondas que viaja en la orina que fluye a través de una uretra afectada por una patología. Dicha afección se traduce en una reducción anómala del diámetro interno de la uretra o en alguna protuberancia dentro del conducto, que impide el flujo normal de la orina. En ambas situaciones se presume que la onda natural de la orina se modifica por efectos de reflexión, superposición e interferencia.

Mecánica de fluidos

La mecánica de fluidos se separa en dos grandes ramas, la primera es la estática de fluidos que se centra en el estudio de fluidos en reposo o en condiciones de equilibrio. La segunda rama es la dinámica que fluidos que estudia a los fluidos en

movimiento. Esta última es más compleja y por ello comúnmente se recurre al análisis de modelos idealizados para describir fenómenos que se observan en la práctica.

La mecánica de fluidos juega un gran papel en el cuerpo humano ya que describe distintos fenómenos como el bombeo de sangre a través de venas y arterias, o el proceso de micción. En este último el movimiento de la orina a través de la uretra puede modelarse como el flujo de un fluido a través de una tubería. Para ilustrar esto, en esta segunda parte del capítulo se describen los conceptos necesarios para visualizar el fenómeno desde el punto de vista de la mecánica de fluidos.

Clasificación del flujo de fluidos

En la vida cotidiana se pueden encontrar fluidos que fluyen bajo condiciones o escenarios distintos. Para estudiarlos de manera más eficiente es conveniente clasificarlos de acuerdo con sus características comunes. Algunas de las clasificaciones más usadas son:

- Región viscosa y no viscosa

Cuando dos capas contiguas de fluido se mueven en relación con la otra, las fuerzas de cohesión intermoleculares actúan haciendo que la capa más lenta desacelere a la capa más rápida causando fricción entre ellas. Esta resistencia a fluir es llamada viscosidad y en esencia no hay algún fluido que no posea dicha característica; sin embargo, dentro de un fluido hay regiones en las que la viscosidad puede desprejarse, éstas son conocidas como regiones no viscosas.

Cuando un fluido en movimiento interactúa con una superficie sólida, la interfase sólido-líquido crea una región donde los efectos viscosos son significativos.

- Flujo interno y externo

Esta clasificación depende del lugar en el que un fluido es obligado a fluir. Si fluye sobre una superficie no limitada, se habla de un flujo externo, por el contrario, si el flujo es limitado por superficies sólidas, se trata del flujo interno.

Los flujos internos están dominados por los efectos de la viscosidad en todo su campo de flujo. Para los flujos externos, los efectos de la viscosidad actúan únicamente en la capa colindante a la superficie sólida sobre la que fluye.

- Flujo compresible e incompresible

La compresibilidad o incompresibilidad, depende de la variación en la densidad del fluido mientras este fluye. En esencia, la densidad de los líquidos se mantiene constante a lo largo del flujo, por ello se clasifican como incompresibles. Por otro lado, los gases son altamente compresibles ya que, con una leve variación en la presión, su densidad se ve alterada de forma significativa.

- Flujo laminar y turbulento

Cuando una partícula de un fluido se mueve siguiendo una trayectoria semirrecta y las partículas detrás de ella siguen la misma trayectoria, se dice que el movimiento es ordenado o laminar. El flujo de los fluidos altamente viscosos es normalmente laminar.

Cuando el movimiento de las partículas del fluido es desordenado, se trata de un flujo turbulento. Este tipo de flujo es común en fluidos de baja viscosidad a altas velocidades y con variaciones en la velocidad.

El flujo que cambia entre laminar y turbulento de manera aleatoria es conocido como flujo de transición (Figura 29). Para determinar el régimen del flujo se recurre al número de Reynolds. La transición entre el flujo laminar y turbulento depende de varios factores como la velocidad del flujo, su temperatura, la geometría del conducto por el que fluye, la rugosidad de la superficie interna del conducto, entre otras (Cengel & Cimbala, 2012a).

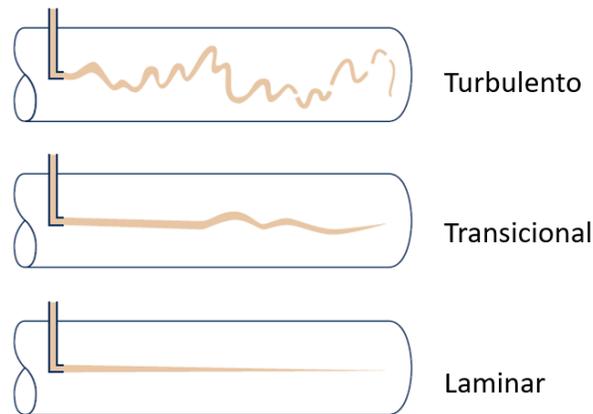


Figura 29. Representación visual de los tipos de flujo. Modificado de: Munson et al., 2013b.

El número de Reynolds se determina mediante el cociente de las fuerzas inerciales entre las fuerzas viscosas (Ecuación 5):

$$Re = \frac{V_{prom}D}{\nu} \quad (5)$$

Donde V_{prom} es la velocidad promedio del flujo (m/s), D es la longitud característica de la geometría del tubo (m , idealizando a la uretra como una tubería circular, se trata del diámetro interno) y ν es la viscosidad cinemática del fluido (m^2/s).

En la práctica no se logran obtener valores muy precisos del número de Reynolds, es por ello que se designan distintos rangos para los flujos laminar, transicional y turbulento. Para el flujo interno en una tubería circular se tiene lo siguiente:

$$Re \leq 2300 \quad \text{Flujo laminar}$$

$2300 \leq Re \leq 4000$ Flujo transicional

$Re \geq 4000$ Flujo turbulento

El flujo que se estudiará en el caso particular de este proyecto, fluirá a través de la uretra, la cual se considera como un tubo circular. El flujo de estudio se clasifica como viscoso, incompresible y transicional.

Patrones de flujo y visualización

Para analizar la cinemática de un flujo, hacen falta conocimientos físicos y matemáticos avanzados, sin embargo, el simple hecho de observar ciertas características del flujo ofrece información importante. Algunas de estas características son:

- Líneas de corriente

Una línea de corriente es una curva que, en todas partes, es tangente al vector de velocidad local instantánea (Munson et al., 2013a). Las líneas de corriente sirven para mostrar la dirección instantánea del movimiento de un flujo, sin embargo, no se pueden observar de manera experimental para un fluido en movimiento. Para una representación visual se recurre al modelado matemático del campo de vectores de velocidad instantánea

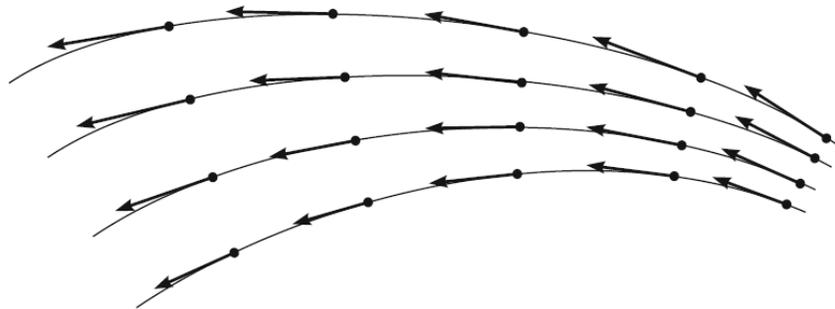


Figura 30. Campo de vectores de velocidad instantánea (Flechas negras) y líneas de flujo (líneas grises). Modificado de: Hutter & Wang, 2016.

- Líneas de trayectoria

“Una línea de trayectoria es la trayectoria real recorrida por una partícula de fluido durante algún periodo de tiempo” (Cengel & Cimbala, 2012b).

Para observarlas de forma experimental comúnmente se dejan trazas de algún color o marcador que brille, suspendidas en el fluido. Luego se toma una imagen de larga exposición, la cual registrará la trayectoria de las trazas (Figura 31).

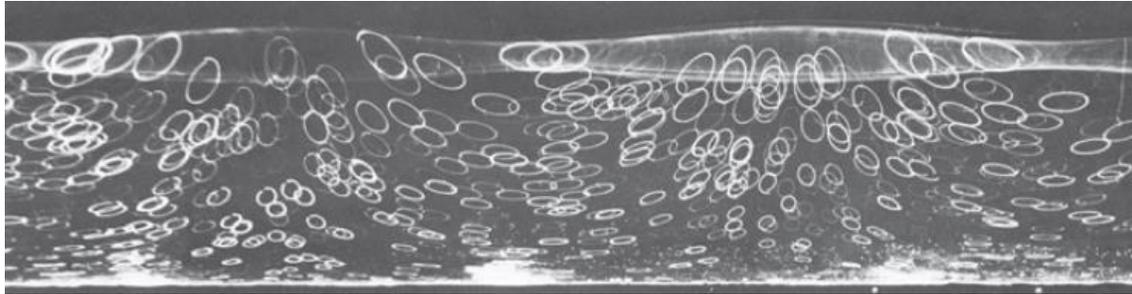


Figura 31. Líneas de trayectoria de trazas blancas suspendidas en agua. La trayectoria elíptica es debida a olas que viajaban de forma horizontal. Tomado de: Cengel & Cimbala, 2012b.

- Líneas de traza

Representa una imagen instantánea de la posición de todas las partículas del flujo que han pasado por un punto dado (Franzini & Finnemore, 1999). Las líneas de traza son el patrón de flujo más comúnmente utilizado en experimentos físicos. Para visualizarlas hace falta inyectar al flujo que se desea analizar, una corriente de fluido trazador y el patrón que resulta de este flujo será una línea de traza (Figura 32).



Figura 32. Línea de traza producidas por el humo de un cigarro. Tomado de: Hutter & Wang, 2016.

- Líneas fluidas

Una línea fluida es un conjunto de partículas adyacentes de fluido que se marcaron en el mismo instante, son mayormente utilizadas para analizar la uniformidad de un flujo. En las regiones cercanas a las paredes, la velocidad del fluido es cero debido a efectos de la fricción (esto es conocido como condición de no deslizamiento) y es por ello que las líneas fluidas se curvan cerca de estas regiones.

Para visualizar líneas fluidas en un experimento (Figura 33) se utiliza un hilo de burbujas de hidrógeno, éstas se producen mediante la electrólisis del agua. Gracias a que las burbujas de hidrógeno son pequeñas y su flotación es despreciable, se adecuan al avance del flujo.

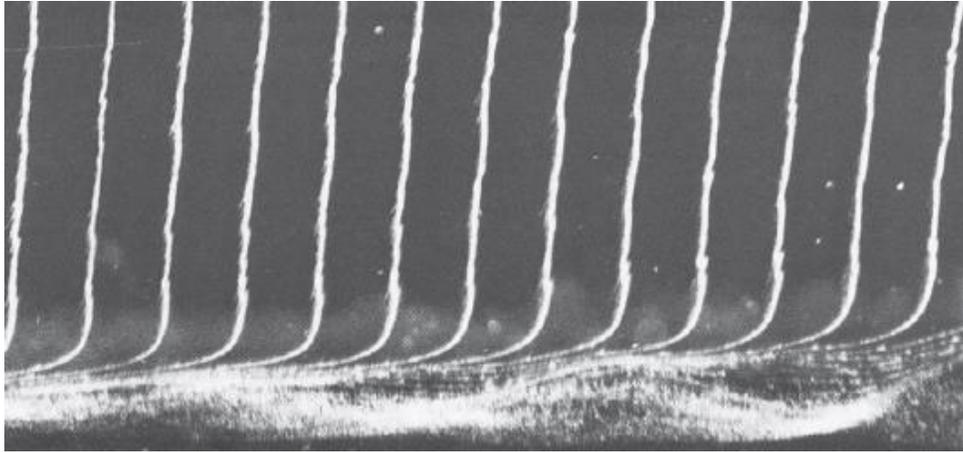


Figura 33. Líneas fluidas generadas por un hilo de burbujas de hidrógeno. El movimiento del flujo va de izquierda a derecha. Tomado de: Cengel & Cimbala, 2012b.

Capítulo 5

Desarrollo del proyecto

Esta investigación se realiza con el fin de sentar las bases necesarias para la construcción de un sistema de apoyo al diagnóstico de enfermedades que se manifiesten causando alteraciones en el tracto urinario inferior masculino, utilizando como objeto de análisis a las ondas mecánicas que viajan en el chorro de orina que sale del paciente.

Para validar la viabilidad de la idea expuesta, el desarrollo del proyecto se dividió en una etapa de experimentación a través de un modelo anatómico y en una segunda etapa de análisis mediante la construcción del modelo matemático que describe el comportamiento del fenómeno físico.

Pruebas con el modelo anatómico

La técnica propuesta para la detección de alteraciones en el tracto urinario inferior masculino se basa en el análisis del perfil de onda en la orina. Para iniciar con el estudio se contemplaron dos casos. El primero es el de un paciente sano que no padece de alguna condición o enfermedad que le altere el tracto urinario inferior, dicho caso será referido como “No patológico”. El segundo caso consiste en un paciente que padece de alguna enfermedad o condición que le produce una o varias alteraciones en el tracto urinario inferior, este es el caso “Patológico”.

Para simular ambos casos, se construyó un modelo anatómico que consta de vejiga, uretra, próstata y pene como se puede ver en la Figura 34.

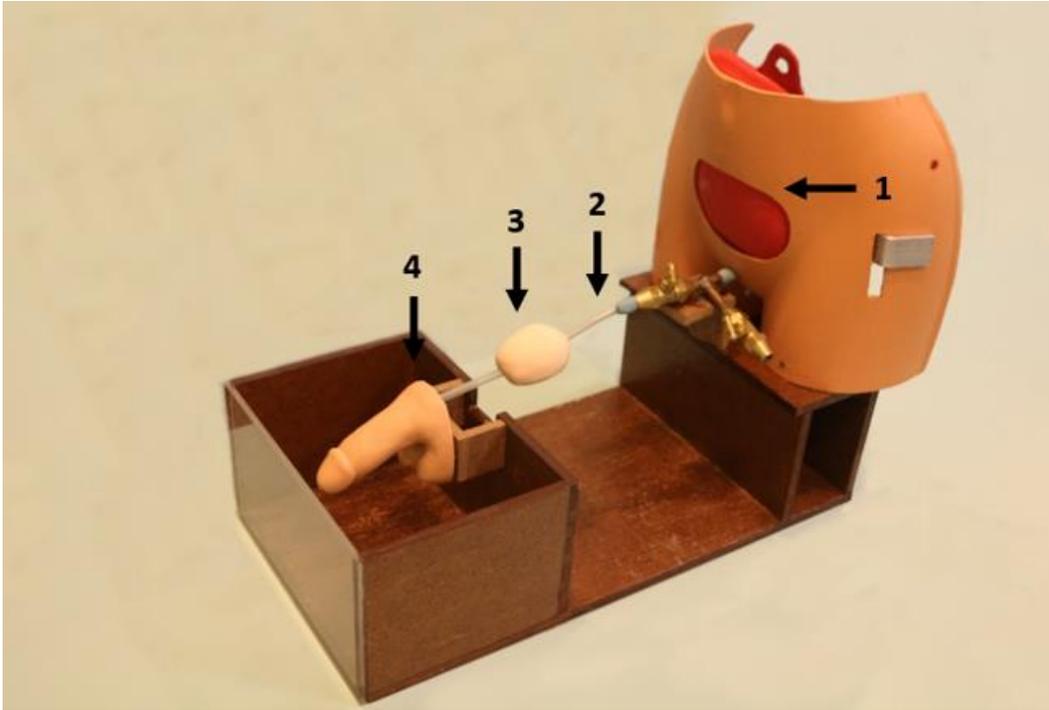


Figura 34. Modelo anatómico para simulación de alteraciones en el tracto urinario inferior. Este modelo simula algunos de los órganos que intervienen en el proceso de micción como lo son vejiga (1), uretra (2), próstata (3) y pene (4).

El objetivo del modelo anatómico fue el de simular el proceso de micción. Para ello se llenó la vejiga del modelo con agua y mediante las llaves se dio paso al flujo del agua a través de la manguera (uretra) para finalmente salir por el pene y caer en la tina.

Para simular el caso No patológico, se realizó el proceso descrito anteriormente sin ninguna modificación. Por otro lado, para simular el caso Patológico se realizó una constricción en la manguera para recrear la alteración que le produce a la uretra un tumor en la próstata. En ambas simulaciones, el chorro de agua que salía del modelo anatómico es enfrentado a una pantalla de acrílico transparente con el fin de simular un corta transversal en el chorro. Después, mediante una cámara Canon 70D con lente de 100 mm, F2.8, ISO 100 USM, fija en una misma posición y sin variar el enfoque entre cada toma, se capturó una serie de imágenes (Figura 35) para ser analizadas de manera digital.



Figura 35. Imagen del chorro de agua a la salida del modelo anatómico para simulación de alteraciones en el tracto urinario inferior. Esta imagen se obtuvo al simular condiciones No patológicas.

El análisis de las imágenes consistió en primera instancia, en encontrar características cualitativas que distinguieran los casos de simulación y posteriormente mediante el *software* MATLAB R2019a se realizó un tratamiento digital a las imágenes al aplicar filtros de contraste y de perfilado (Figura 36, Anexo 1) para facilitar la medición de la longitud y la amplitud de las ondas que viajaban en el chorro de agua.

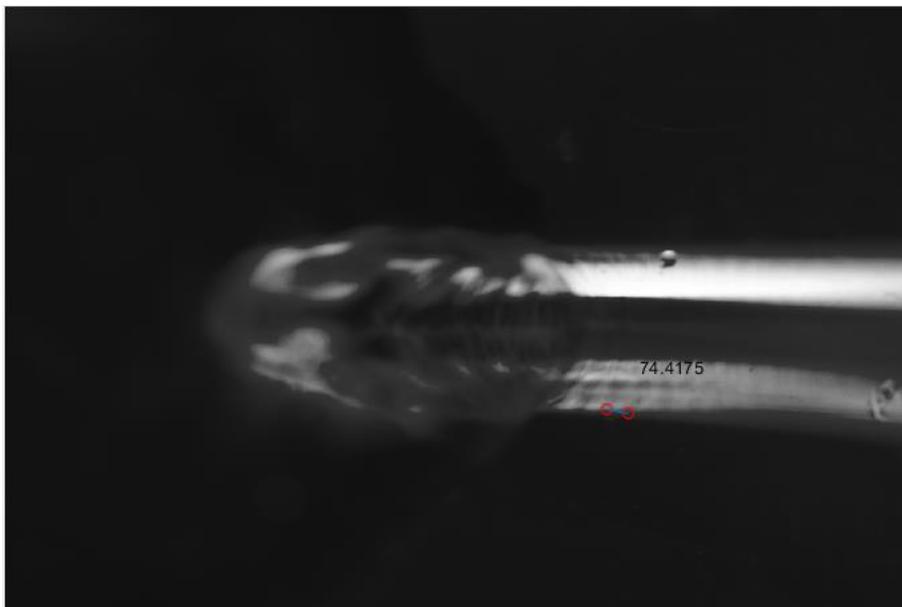


Figura 36. Ejemplo de imagen sometida a análisis digital. Se aplicó un filtro de contraste a la imagen para resaltar la forma de las ondas longitudinales y posteriormente medirlas.

Modelo matemático

Para continuar con el estudio se realizaron simulaciones computacionales mediante el *software* COMSOL Multiphysics 5.6. Se modeló en un espacio de dos dimensiones, el flujo laminar de un líquido a través de una tubería con sección transversal circular, la cual estaba llena por completo. Además, se realizó un estudio acústico de las ondas que viajan por el fluido para observar su comportamiento en la sección transversal del tubo.

Análisis del flujo

Para el estudio del flujo se modelaron los siguientes 4 casos de interés: Tubería con deformación circular, Tubería con deformación elíptica, Tubería con múltiples deformaciones y Tubería sin deformación.

En cada uno de los modelos anteriores, se realizó un estudio temporal haciendo uso del módulo de flujo de fluido y los submódulos de flujo monofásico y flujo laminar que ofrece el *software* COMSOL Multiphysics. Para esto, se diseñó como espacio de análisis una tubería de 4 cm de largo por 5 mm de ancho, teniendo en mente las dimensiones de la uretra prostática puesto que esta porción de la uretra se ve fácilmente expuesta a deformaciones causadas por enfermedades como el cáncer de próstata o la hiperplasia prostática benigna.

Se optó utilizar el agua como fluido de análisis debido a que sus propiedades físicas son bien conocidas. La velocidad del flujo de entrada para cada uno de los casos de interés se modeló con comportamiento de una onda senoidal con frecuencia angular de 10 Hz, amplitud de 2 m/s y *offset* de 2 m/s. Esto debido a que parte de la sesión exploratoria con el paciente, consistirá en aplicar un estímulo mecánico periódico sobre su vejiga con el fin de inducir un comportamiento ondulatorio en la orina.

La formación de tumores en la próstata, uretra y pene, además del agrandamiento de la próstata en la hiperplasia benigna prostática, no siguen un patrón de formación ni tienen reglas específicas de crecimiento. Así que luego de observar fotografías de estas enfermedades, se optó por modelar geoméricamente estas manifestaciones de enfermedad mediante medios círculos y medias elipses.

Para el modelo de tubería con deformación circular, se colocó un medio círculo con radio de 2 mm en la parte inferior del tubo a una distancia de 1 cm de la sección de entrada del fluido (Figura 37).

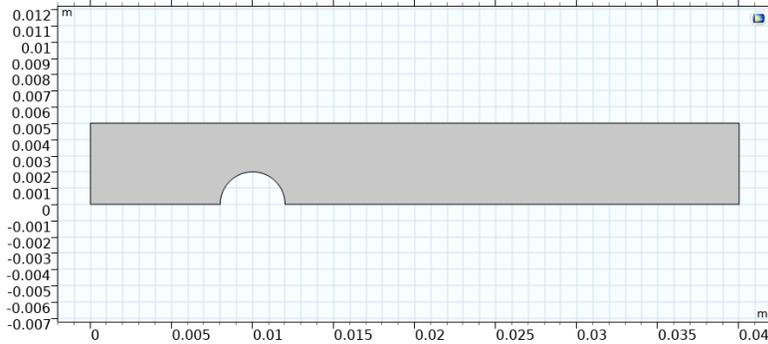


Figura 37. Modelo de análisis del caso de interés "Tubería con deformación circular".

El modelo de tubería con deformación elíptica tiene media elipse con semieje mayor de 4 mm y semieje menor de 2.5 mm colocada a 1.5 cm con respecto al centro de la media elipse (Figura 38).

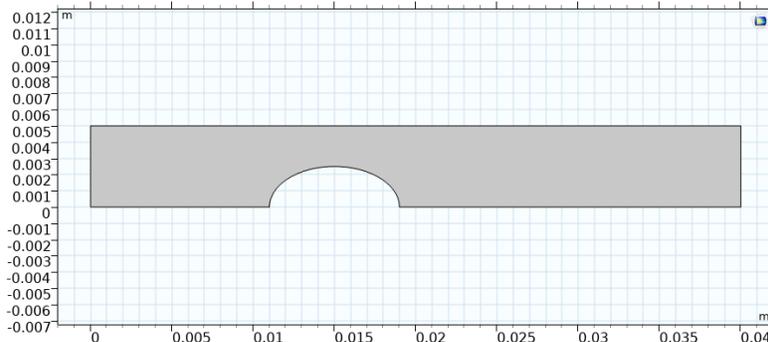


Figura 38. Modelo de análisis del caso de interés "Tubería con deformación elíptica".

El caso de interés Tubería con múltiples deformaciones, es una combinación de los casos anteriores, cambiando únicamente las coordenadas en las que se sitúan el medio círculo (8 mm desde la sección de entrada del fluido y colocado en la parte superior del tubo) y la media elipse (2 cm desde la sección de entrada del fluido), esto puede observarse en la Figura 39.

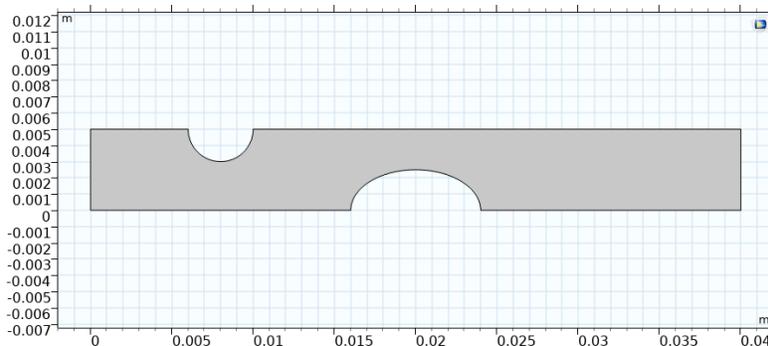


Figura 39. Modelo de análisis del caso de interés "Tubería con múltiples deformaciones".

Finalmente está el caso de Tubería sin deformación, este modelo sólo se limitó a las condiciones base descritas anteriormente.

Formas de modos acústicos

Se realizó también un análisis de los modos acústicos confinados en el área de la sección transversal circular de la cual consta el tubo. Al igual que en los estudios anteriores se modelaron dos casos relativos a condiciones sanas y patológicas.

Para el caso con condiciones sanas se modeló una tubería de 5 mm de diámetro externo y 4.75 mm de diámetro interno (Figura 40). Para el desarrollo de este modelo fue necesario definir el módulo de Young, coeficiente de Poisson y densidad del material del que está fabricada la tubería. En condiciones reales, se tendrían que tomar estas propiedades del tejido con el cual está hecho la uretra masculina, sin embargo, dichas propiedades no se encuentran estandarizadas. Para continuar con el desarrollo del análisis se considera que la tubería está fabricada en acero y se toman las propiedades precargadas en el *software*. Nuevamente se utilizan las propiedades del agua para definir el fluido, el cual llena por completo la tubería.

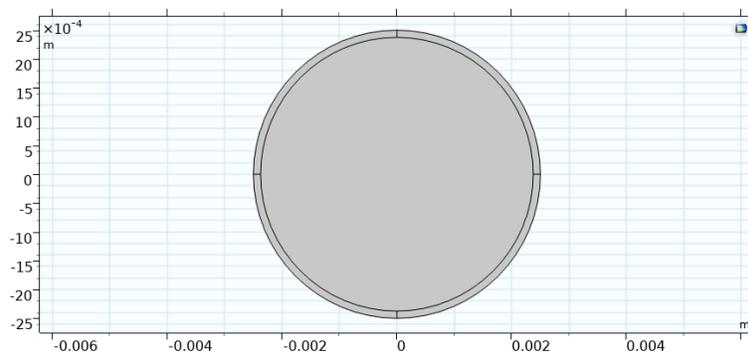


Figura 40. Modelo de tubería con sección transversal circular sin deformaciones.

Para el segundo modelo se utilizaron las características del anterior añadiendo una deformación semicircular con radio de 1 mm, colocado a una distancia de 2 mm desde el centro geométrico del tubo hasta el centro de la deformación (Figura 41).

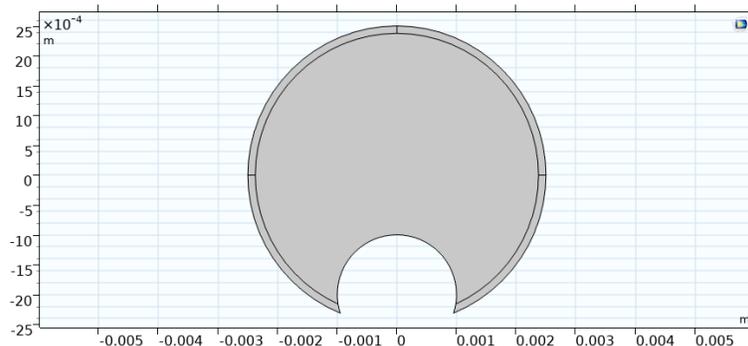


Figura 41. Modelo de tubería con sección transversal circular y con deformación.

El estudio se realizó considerando un movimiento ondulatorio con frecuencias de 1 Hz hasta 10 Hz, esto debido a la aplicación práctica. La frecuencia de la señal inducida en el paciente estará en función del estímulo mecánico sobre la vejiga. Con el fin de evitar cualquier tipo de daño, se decidió utilizar el rango de frecuencias mencionadas.

Capítulo 6 Resultados

Modelo anatómico

Se compararon las fotografías tomadas durante las simulaciones Patológica y No patológica y mediante simple inspección se encontraron características cualitativas que distinguen a los casos simulados. En la Figura 42 se han marcado con letras mayúsculas las imágenes que resultaron de la simulación Patológica y se puede observar un patrón en ellas. La distribución del agua que escurre por la pantalla de acrílico luce ramificada, en cambio, durante la simulación Patológica, la distribución del agua se nota más suave y uniforme.

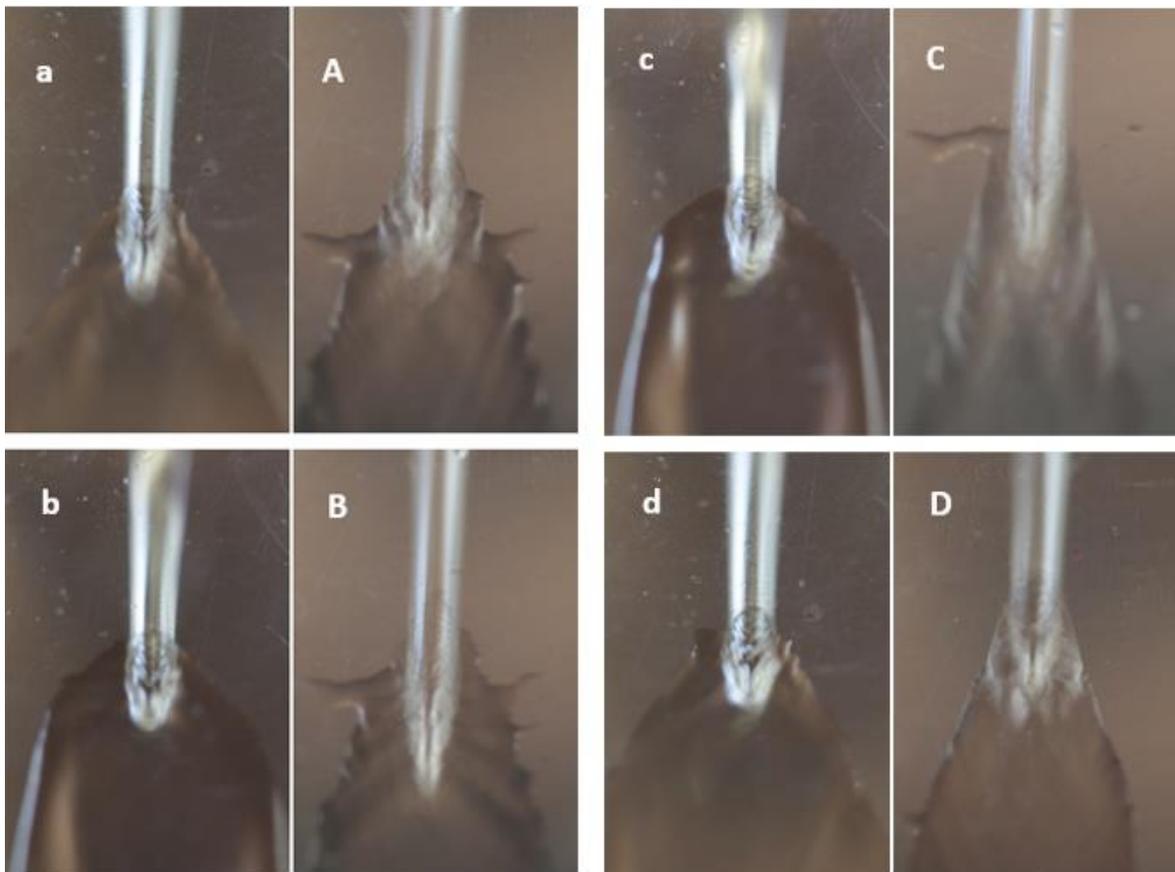


Figura 42. Comparación de los chorros de agua a la salida del modelo anatómico, entre las simulaciones Patológicas (A, B, C, D) y No patológicas (a, b, c, d).

Además del estudio cualitativo, se realizó un análisis cuantitativo mediante el cual, al aplicar filtros a las imágenes, se destacaban las ondas longitudinales que viajaban en el agua. De estas, se midieron la longitud y la amplitud de las ondas.

Se encontró que las longitudes de onda medidas en las imágenes obtenidas de las simulaciones no patológicas difieren de manera significativa de las obtenidas en las simulaciones patológicas ($t = 6.970$; $P < 0.0001$)

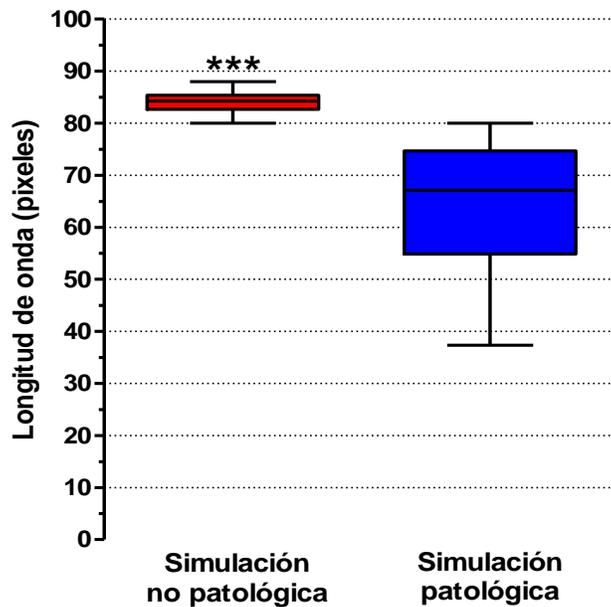


Figura 43. Efecto del tipo de simulación en la longitud de la onda medida en el chorro de agua. Con los asteriscos (***) representando una $P < 0.0001$.

Por otro lado se pudo observar que amplitudes del perfil de onda en simulaciones no patológicas, también difieren de manera significativa de las registradas en las simulaciones patológicas ($Z = -2.483$; $P = 0.0131$)

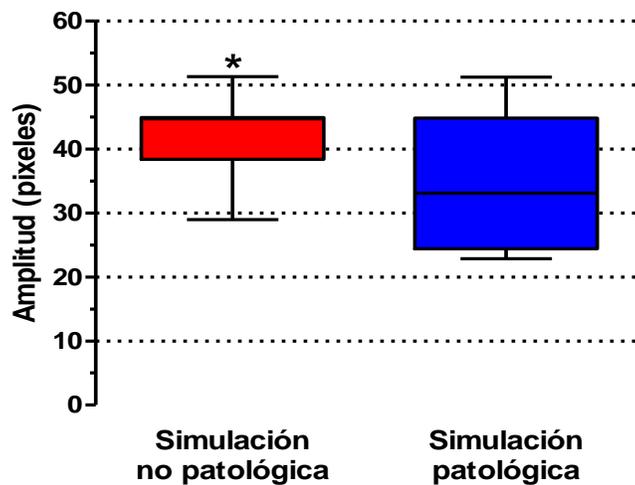


Figura 44. Efecto del tipo de simulación en la amplitud de la onda medida en el chorro de agua. Con el asterisco (*) representando una $P = 0.0131$.

Modelo matemático

Análisis del flujo

Como resultado de las simulaciones, se obtuvo el campo de velocidades del flujo para cada uno de los casos de interés. Puede observarse que, dependiendo de la geometría y tamaño de la deformación, la velocidad del flujo puede verse incrementada o disminuida.

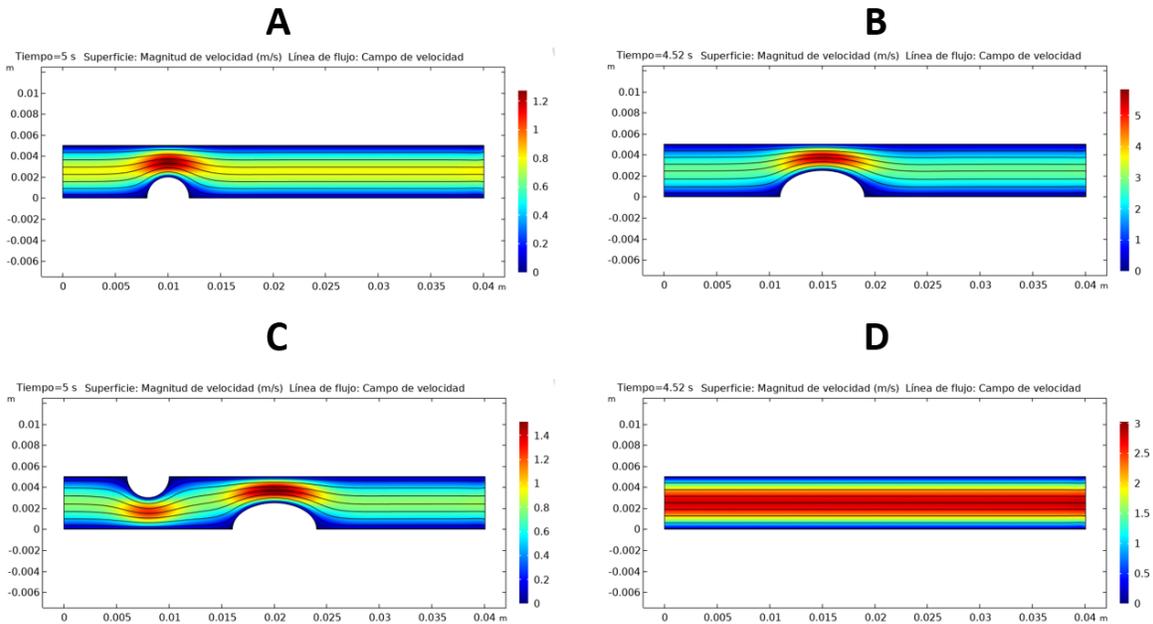
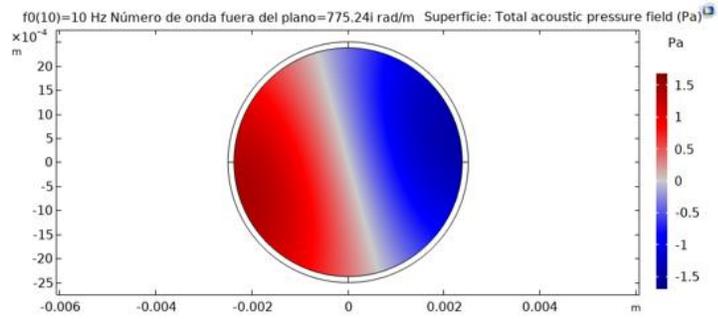


Figura 45. Campos de velocidades de flujo para los casos de simulación A) Tubería con deformación circular, B) Tubería con deformación elíptica, C) Tubería con múltiples deformaciones y D) Tubería sin deformación.

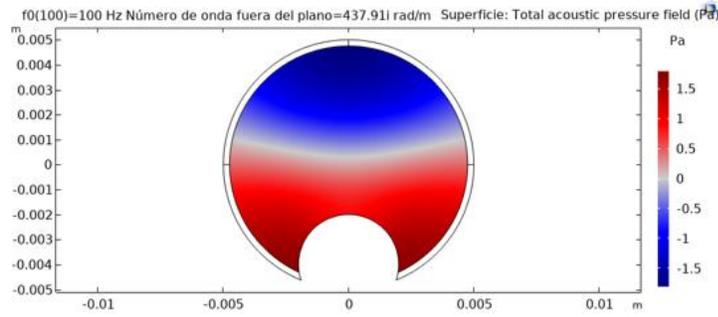
La evolución temporal de cada una de las simulaciones puede verse con más detalle en los Anexos 2 a 5 en donde se observan los cambios del campo de velocidades durante 0.3 segundos. Esto es así puesto que, al regirse el flujo por un comportamiento ondulatorio, a partir de ese punto la evolución se vuelve periódica.

Formas de modos acústicos

Al efectuar las simulaciones de las formas de los modos acústicos se pudo observar el comportamiento del campo de presiones del fluido en la sección transversal. Se puede observar en la Figura 46 que sólo existen dos zonas de presión, una donde la presión es negativa y otra donde es positiva. Esto ocurre invariablemente con las frecuencias de 1 Hz hasta 10 Hz.



A



B

Figura 46. Campo de presiones visto desde la sección transversal de una tubería circular sin A) deformación y con B) deformación semicircular.

Capítulo 7

Discusión

Se ha observado experimentalmente que existen patrones diferenciables entre el patrón de ondas sin obstrucciones en la uretra y con obstrucciones múltiples y única, tal como se aprecia en la Figura 46 “A” y “B” respectivamente. Es importante señalar que el meato urinario cambia la forma de la sección transversal del flujo de orina a la salida en función de la irrigación del pene, por tanto, es necesario incluir un dispositivo que no afecte al perfil de salida y a su vez tenga una geometría de salida estándar. Para este fin, se diseñó el dispositivo de la Figura 47, el cual está fabricado en una sola corrida y geoméricamente diseñado para insertarse con facilidad y causar el mínimo de molestias. La parte interior cuenta con dos aletas que hacen que el flujo se comporte como laminar para poder diferenciar las presiones en el perfil de orina. El dispositivo se inserta 5 mm en la uretra a fin de llegar a la parte diametralmente más amplia. Para efectos de simulación el material de fabricación es PLA debido a la simplicidad de fabricación y resolución. Sin embargo, para fines de aplicación en humanos se propone ABS debido a sus características para la esterilización y desecho/reciclado.

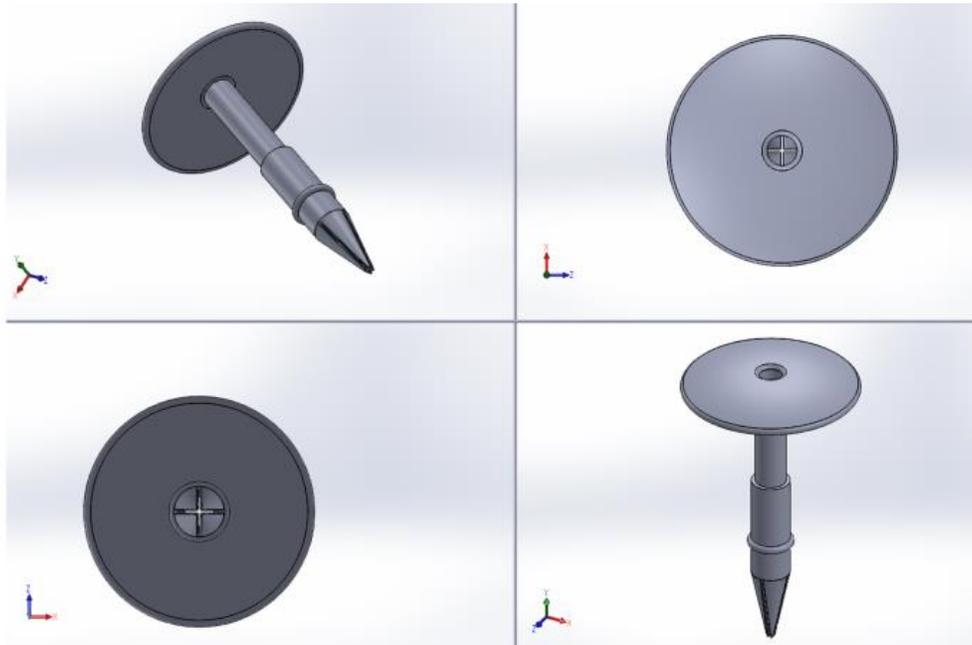


Figura 47. Dispositivo estandarizador de meato urinario.

Es importante señalar que el modelo anatómico utilizado para evaluar el concepto es simplificado del humano, por tanto, no se consideran los músculos que intervienen en la micción como el detrusor y los músculos esfínter. También se sabe que en los humanos la velocidad de flujo disminuye gradualmente complicando la

obtención de las muestras de imagen para la diferenciación del perfil de onda. Por otro lado, cuando la velocidad de flujo es baja, el chorro de la orina se hace intermitente haciendo imposible este caso para la medición. Para resolver este efecto, se cambia el ángulo de la pantalla de acrílico y se acerca lo más posible al pene. En caso de goteo, la técnica presentada en esta tesis resulta inviable, además de ser evidente algún tipo de obstrucción.

Hasta el momento se han considerado modelos de tipo somático ectomorfo y mesomorfo (normopeso), con los que se han tenido resultados favorables, sin embargo, una consideración para tener en cuenta es que las ondas mecánicas inducidas en la superficie de la región abdominal pueden verse disipadas en los casos de sobrepeso, por lo que tendría que aumentarse considerablemente la amplitud de los estímulos. Por otro lado, en los casos de obesidad es posible que tenga que ser rediseñado el dispositivo de excitación ya que las ondas mecánicas se disiparán eliminando el efecto deseado. Cabe mencionar que el alcance de la tesis es demostrar la posibilidad de determinar patrones característicos de casos de normalidad (sanos) y con algún tipo de obstrucción uro-prostática, por tanto, los resultados obtenidos demuestran que es factible el uso de la técnica para algunos casos. En trabajos futuros se realizarán pruebas en humanos, en donde se obtendrán características que determinen los parámetros de diseño tanto del generador de estímulos como del dispositivo estandarizador de meato urinario.

Capítulo 8

Conclusiones y trabajo a futuro

Este proyecto de tesis presenta parte del sustento teórico necesario para mostrar la viabilidad del desarrollo de una nueva técnica que ayude al diagnóstico de algunas enfermedades y padecimientos que afectan al tracto urinario inferior masculino. Mediante experimentación práctica y modelos matemáticos se demostró la posibilidad de determinar patrones característicos que, al ser analizados condujeron a las conclusiones listadas a continuación:

1. A través de las simulaciones realizadas con el modelo anatómico se obtuvieron imágenes con las cuales se puede distinguir entre los casos de simulación luego de hacer con ellas un análisis cuantitativo al medir longitudes y amplitudes de onda.
2. Las longitudes de onda y las amplitudes registradas en las simulaciones No patológicas son mayores a las obtenidas en simulaciones Patológicas. Basándose en estos resultados, se puede definir a estos parámetros como variables de interés para el desarrollo futuro de la investigación.
3. Existe una relación entre las deformaciones en un conducto por el cual fluye un líquido, y el comportamiento del flujo.
4. El paso de las ondas mecánicas en el fluido genera un campo de presiones que se ve afectado por las deformaciones en el conducto.

Estas conclusiones indican que en condiciones ideales el comportamiento ondulatorio y el de la mecánica del flujo se ven afectados por enfermedades que al manifestarse modifican la anatomía de la uretra masculina.

Para desarrollar la mencionada técnica de apoyo al diagnóstico, hace falta realizar una extensa investigación bajo condiciones reales, partiendo desde el conocimiento aquí generado. Como siguiente etapa se plantea el trabajo con pacientes sanos y enfermos (pacientes con alguna enfermedad que afecte al tracto urinario inferior), esto con el fin de obtener la información necesaria para el diseño e implementación de los distintos módulos que conformarán la herramienta de apoyo al diagnóstico.

Algunas de las tareas planeadas como trabajo a futuro son:

1. Diseño y construcción del montaje experimental para la toma estandarizada de fotografías.
2. Diseño y construcción del generador de estímulos para la zona abdominal
3. Rediseño y fabricación del dispositivo estandarizador de meato urinario
4. Caracterización de ondas mecánicas en el chorro de orina de un paciente sano y otro con algún padecimiento en el tracto urinario inferior.

5. Diseño de un sistema de análisis de imágenes para uso médico.

Anexos

Anexo 1.

Script hecho en MATLAB para análisis de imágenes.

```
%%% Calculo longitudes en imagen
clear
%%% Cargar imagen
imdata = imread('C04.jpg');
%frot = imrotate(imdata,90);
gris = rgb2gray(imdata);
%imshow(gris);
%imshow(frot);
%zoom(1.75)
%%%

% %%Perfilado de la imagen
% %I=gris;
% h=fspecial('unsharp');
% J=abs(filter2(h,I));
% J1=J/255; % /max(J(:));
% imshow(J1)
% zoom (2)
% imshow(gris)
%%%

%Aumento y reducción de contraste
I=gris;
I1=im2double(I); %Rango de la imagen en [0,1]
a=0.3 ;
c=180/255 ;
for n=1:5472,
    for m=1:3648,
        if I1(m,n)<c,
            I2(m,n)=I1(m,n)*a;
        else
            I2(m,n)=a*c+(I1(m,n)-c)*(1-a*c)/(1-c);
        end
    end
end
end
figure, imshow(I2)
zoom(1.75)
```

```

%
%%%%%%%%Variables por boton
%imshow
button = 1;
%grid on;
hold on;
%rx=[];
%ry=[];
i=1;
while (button==1)
    [x, y, button]=ginput(1);
    plot(x, y, 'ro');
    hold on;
    rx(i)=x;
    ry(i)=y;
    i=i+1;
end

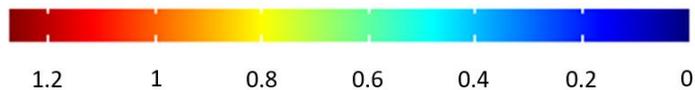
%%%%%%%%Distancia entre dos puntos
d = sqrt( ((rx(1)-rx(2))^2) + ((ry(1)-ry(2))^2) )
line(rx, ry)
gtext(num2str(d))

```

Anexo 2.

Estudio temporal de la velocidad de un fluido a través de un tubo con sección transversal circular y una deformación en forma de semicírculo con radio de 2 mm.

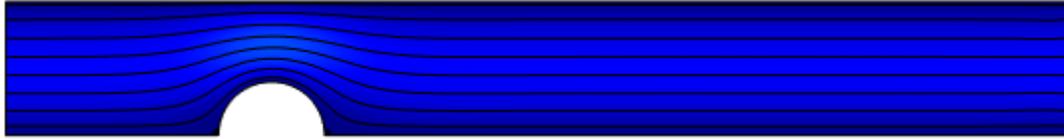
Superficie: Magnitud de velocidad (m/s) Línea de flujo: Campo de velocidad



t = 0 s



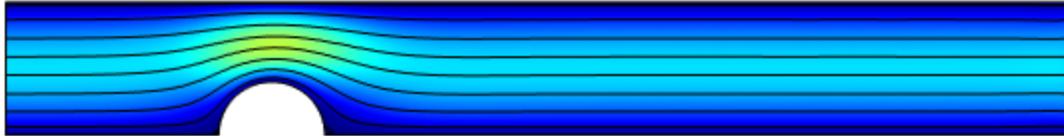
t = 0.02 s



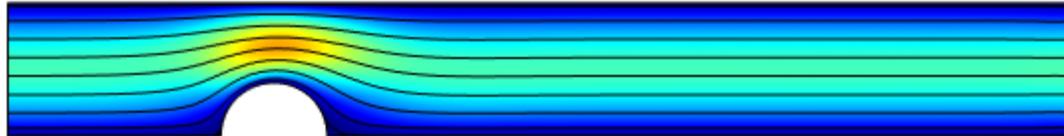
t = 0.04 s



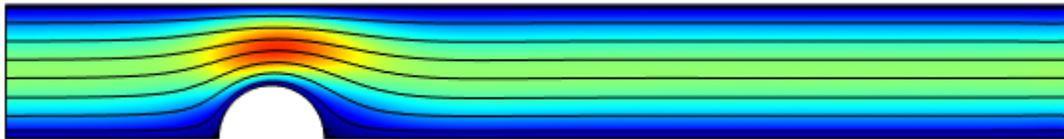
t = 0.06 s



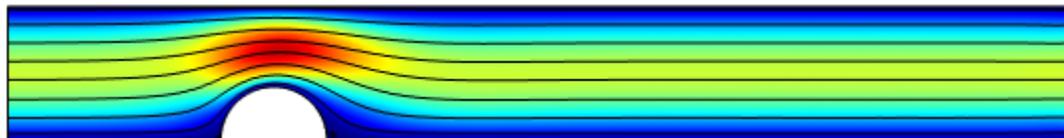
t = 0.08 s



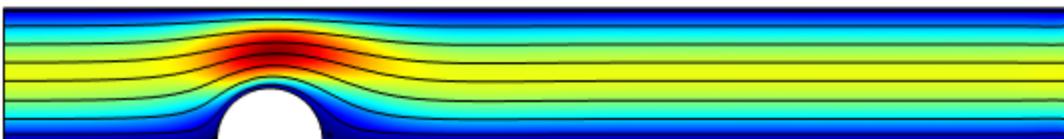
t = 0.10 s



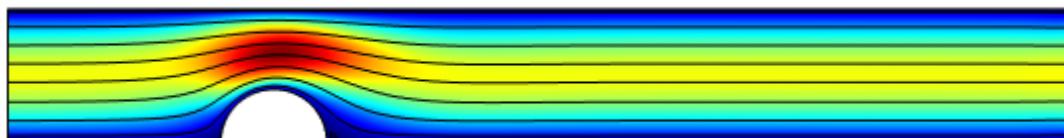
t = 0.12 s



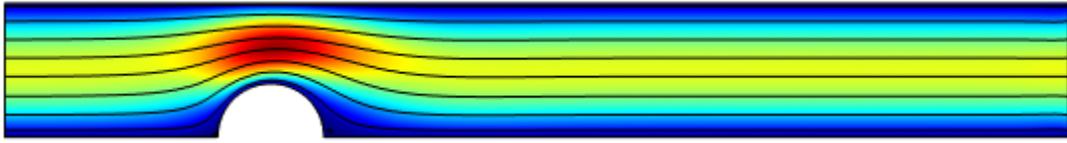
t = 0.14 s



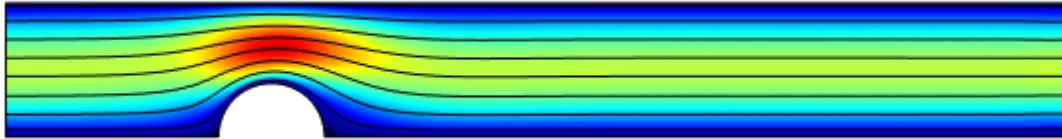
t = 0.16 s



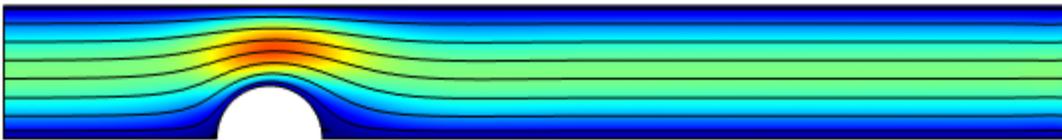
t = 0.18 s



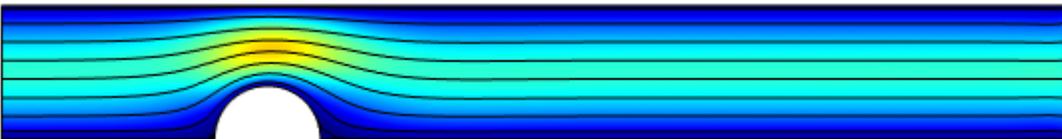
t = 0.20 s



t = 0.22 s



t = 0.24 s



t = 0.26 s



t = 0.28 s



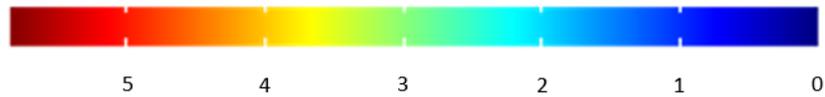
t = 0.30 s



Anexo 3.

Estudio temporal de la velocidad de un fluido a través de un tubo con sección transversal circular y una deformación en forma de semielipse con semieje mayor de 4 mm y semieje menor de 2.5 mm.

Superficie: Magnitud de velocidad (m/s) Línea de flujo: Campo de velocidad



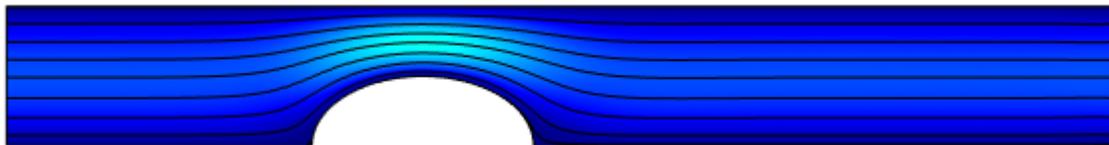
t = 0 s



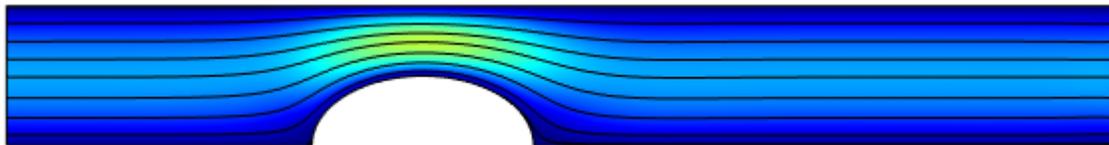
t = 0.02 s



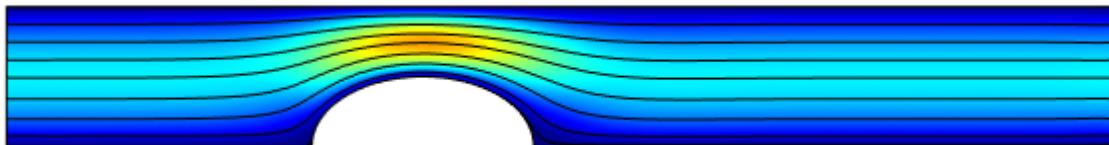
t = 0.04 s



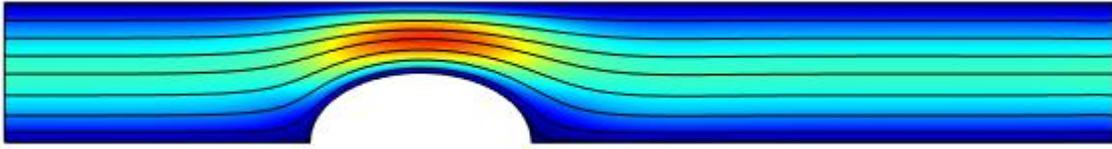
t = 0.06 s



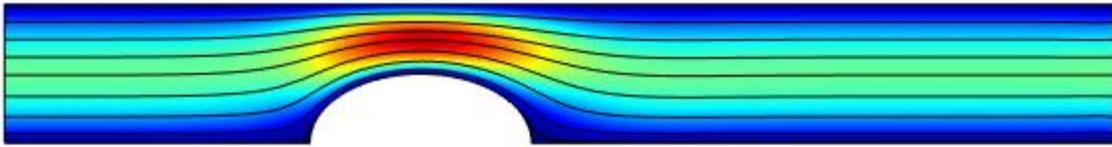
t = 0.08 s



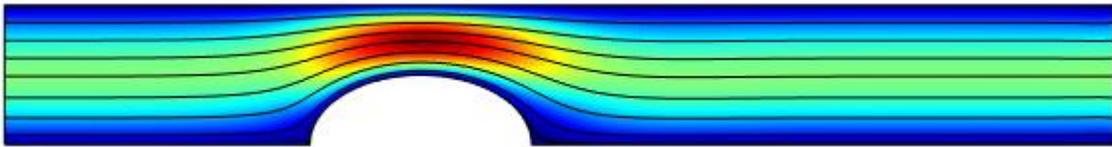
t = 0.10 s



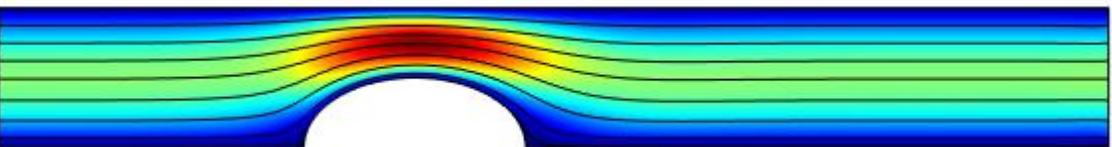
t = 0.12 s



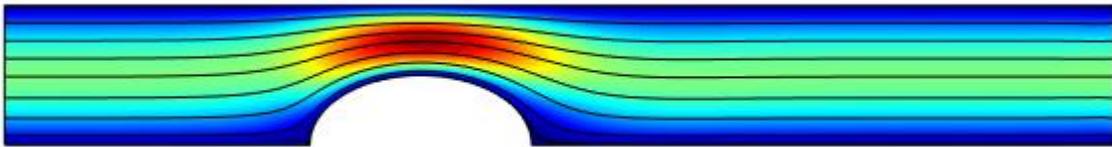
t = 0.14 s



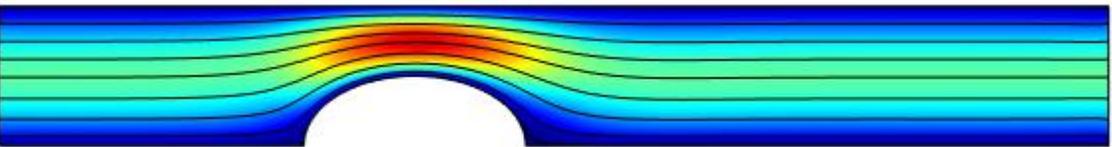
t = 0.16 s



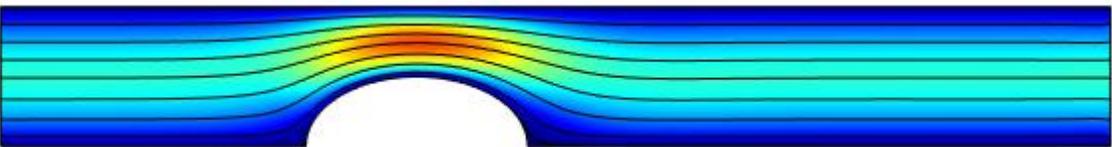
t = 0.18 s



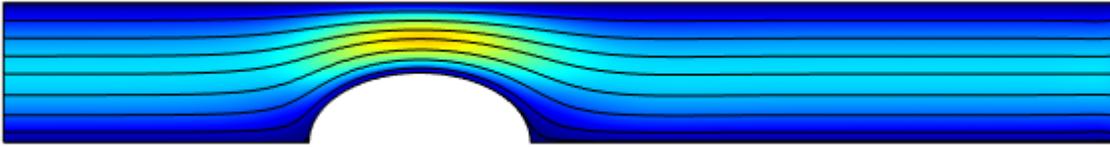
t = 0.20 s



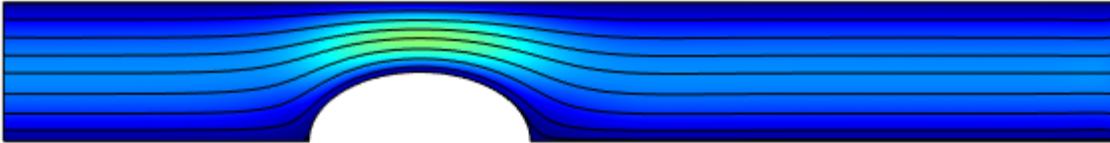
t = 0.22 s



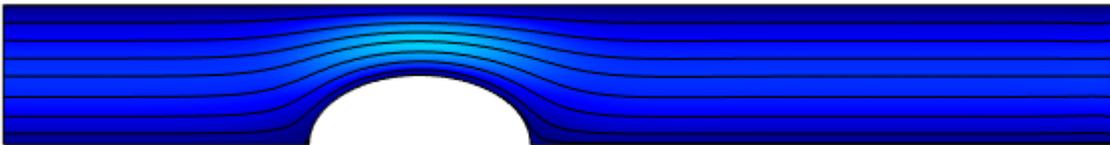
t = 0.24 s



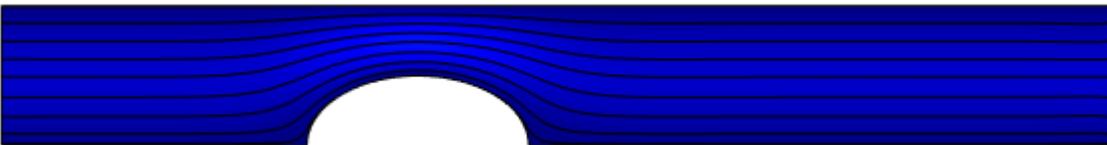
t = 0.26 s



t = 0.28 s



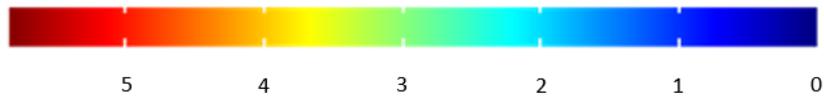
t = 0.30 s



Anexo 4.

Estudio temporal de la velocidad de un fluido a través de un tubo con sección transversal circular y dos deformaciones, una con forma de semicírculo con radio de 2 mm y la segunda con forma de semielipse con semieje mayor de 4 mm y semieje menor de 2.5 mm

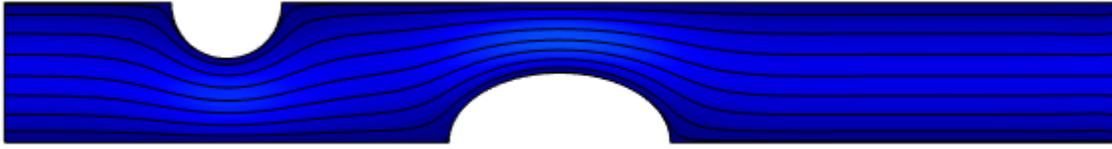
Superficie: Magnitud de velocidad (m/s) Línea de flujo: Campo de velocidad



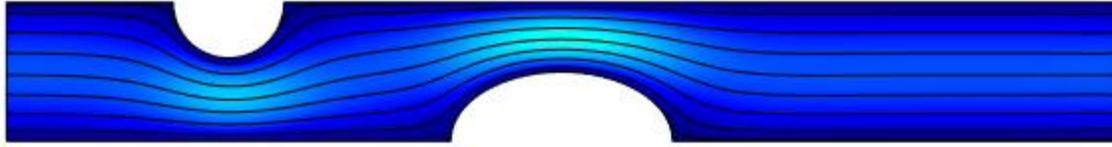
t = 0 s



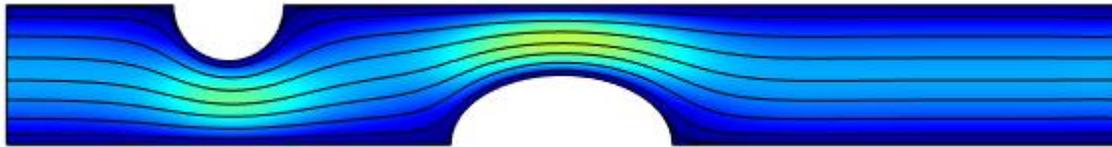
t = 0.02 s



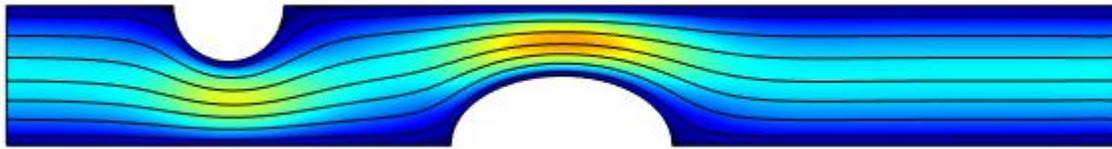
t = 0.04 s



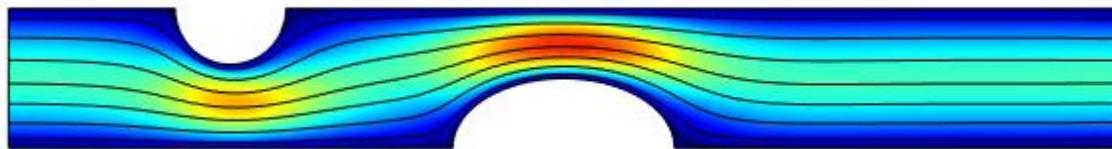
t = 0.06 s



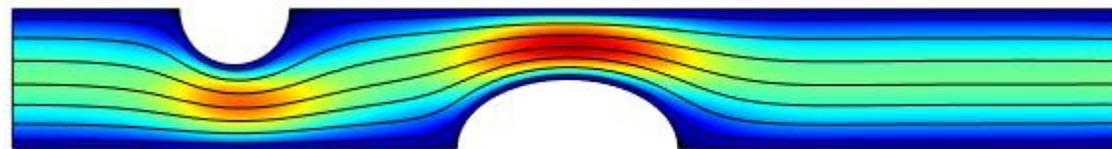
t = 0.08 s



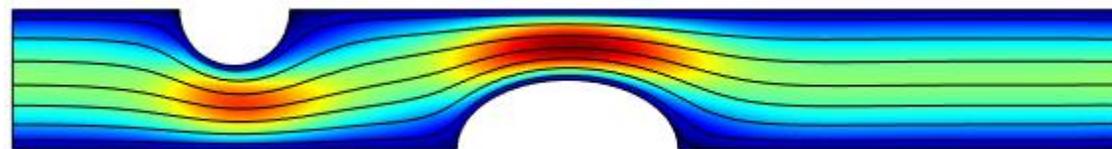
t = 0.10 s



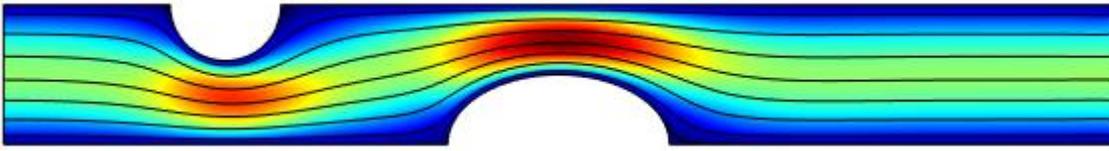
t = 0.12 s



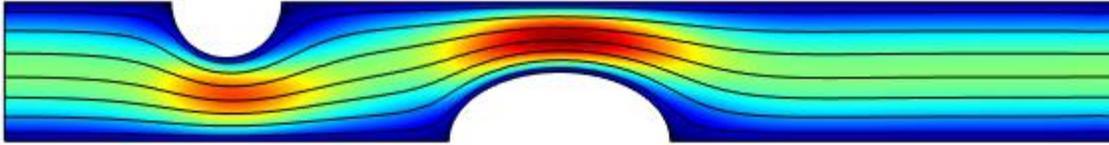
t = 0.14 s



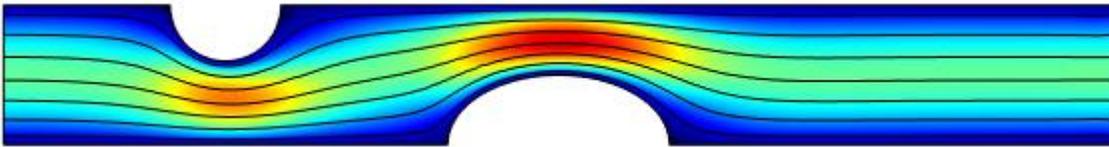
t = 0.16 s



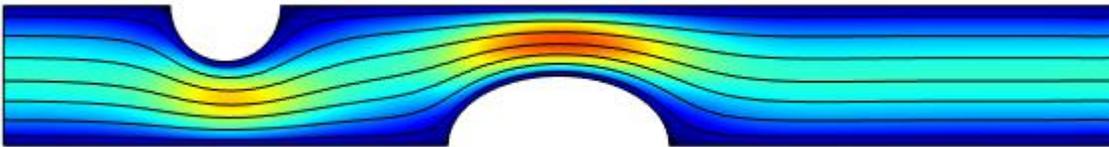
t = 0.18 s



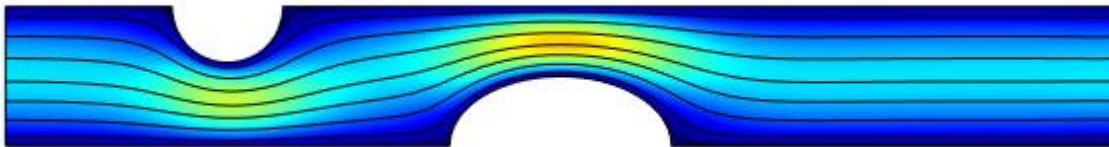
t = 0.20 s



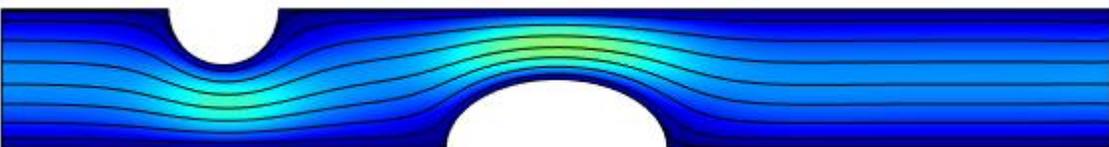
t = 0.22 s



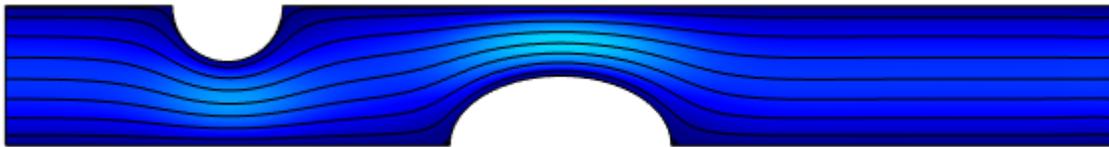
t = 0.24 s



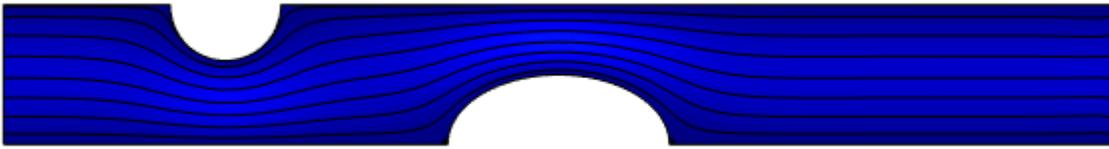
t = 0.26 s



t = 0.28 s



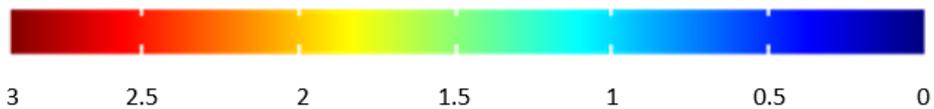
t = 0.30 s



Anexo 5.

Estudio temporal de la velocidad de un fluido a través de un tubo sin deformación alguna y con sección transversal circular.

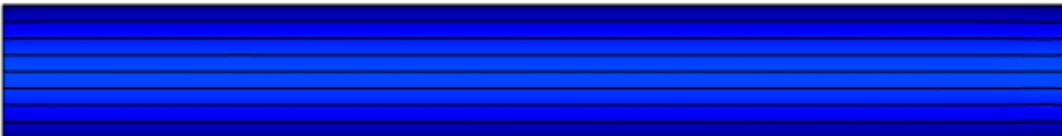
Superficie: Magnitud de velocidad (m/s) Línea de flujo: Campo de velocidad



t = 0 s



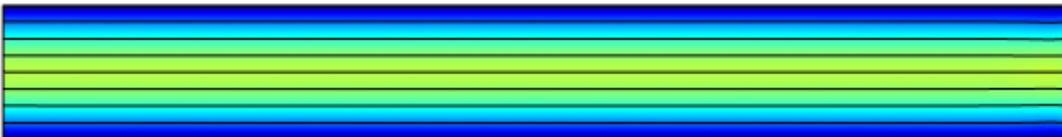
t = 0.02 s



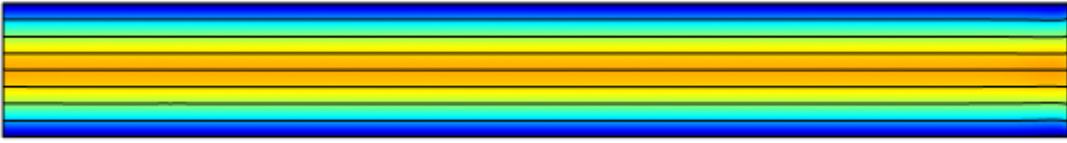
t = 0.04 s



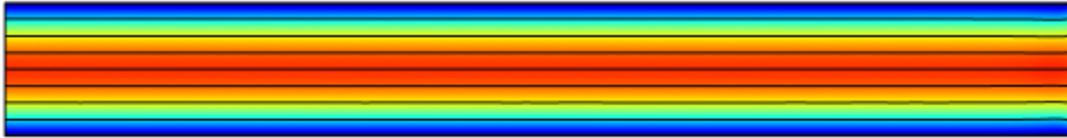
t = 0.06 s



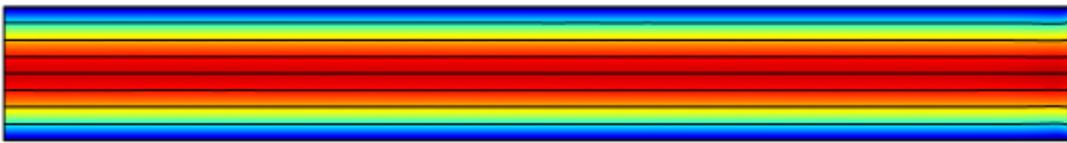
t = 0.08 s



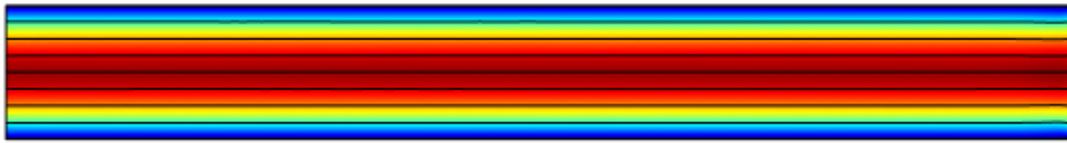
t = 0.10 s



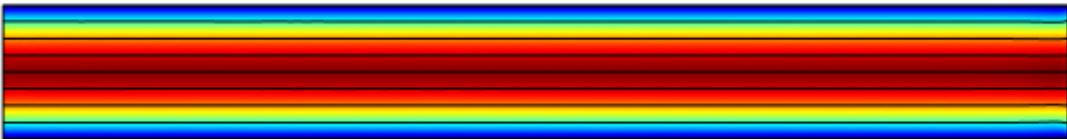
t = 0.12 s



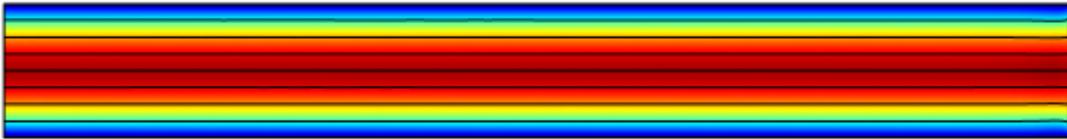
t = 0.14 s



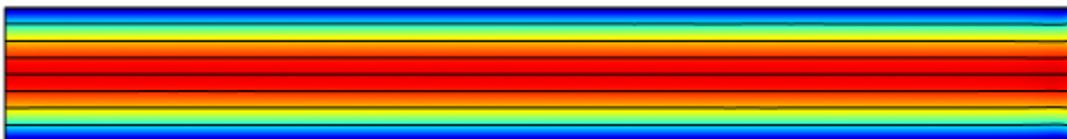
t = 0.16 s



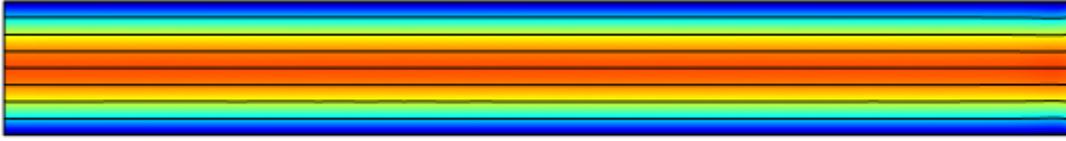
t = 0.18 s



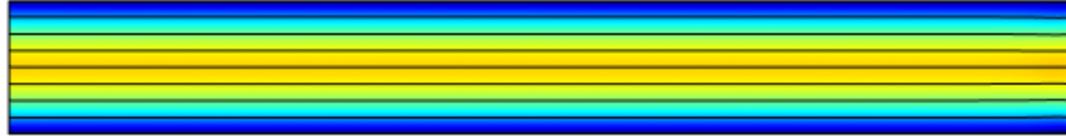
t = 0.20 s



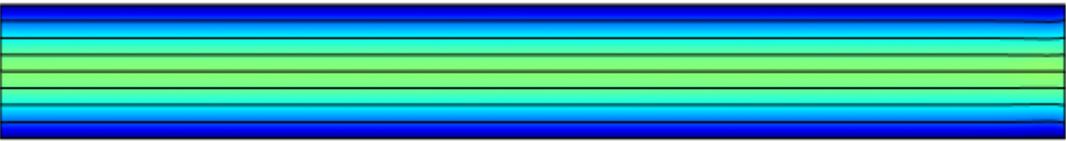
t = 0.22 s



t = 0.24 s



t = 0.26 s



t = 0.28 s

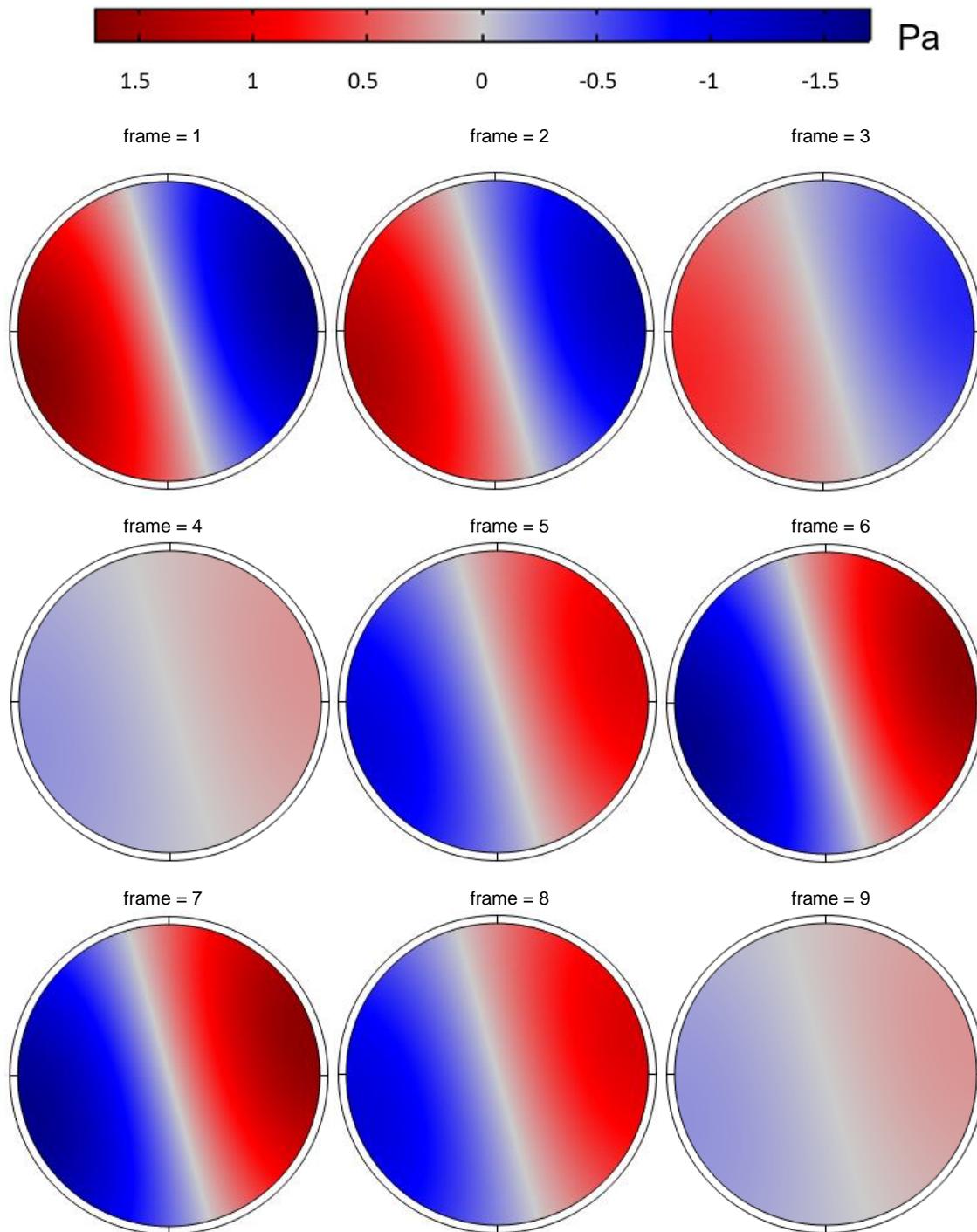


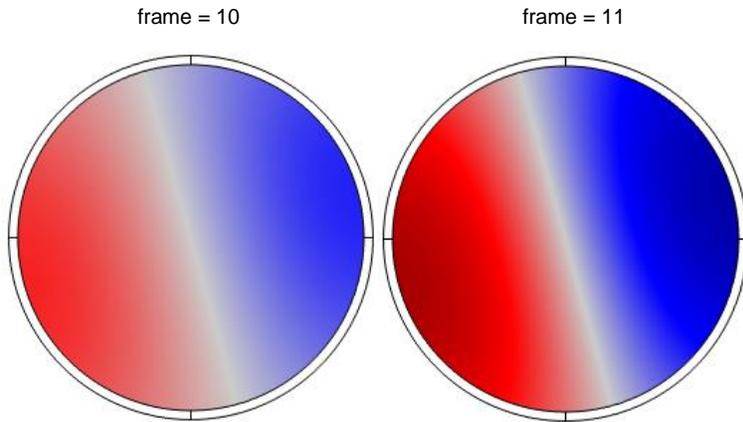
t = 0.30 s



Anexo 6

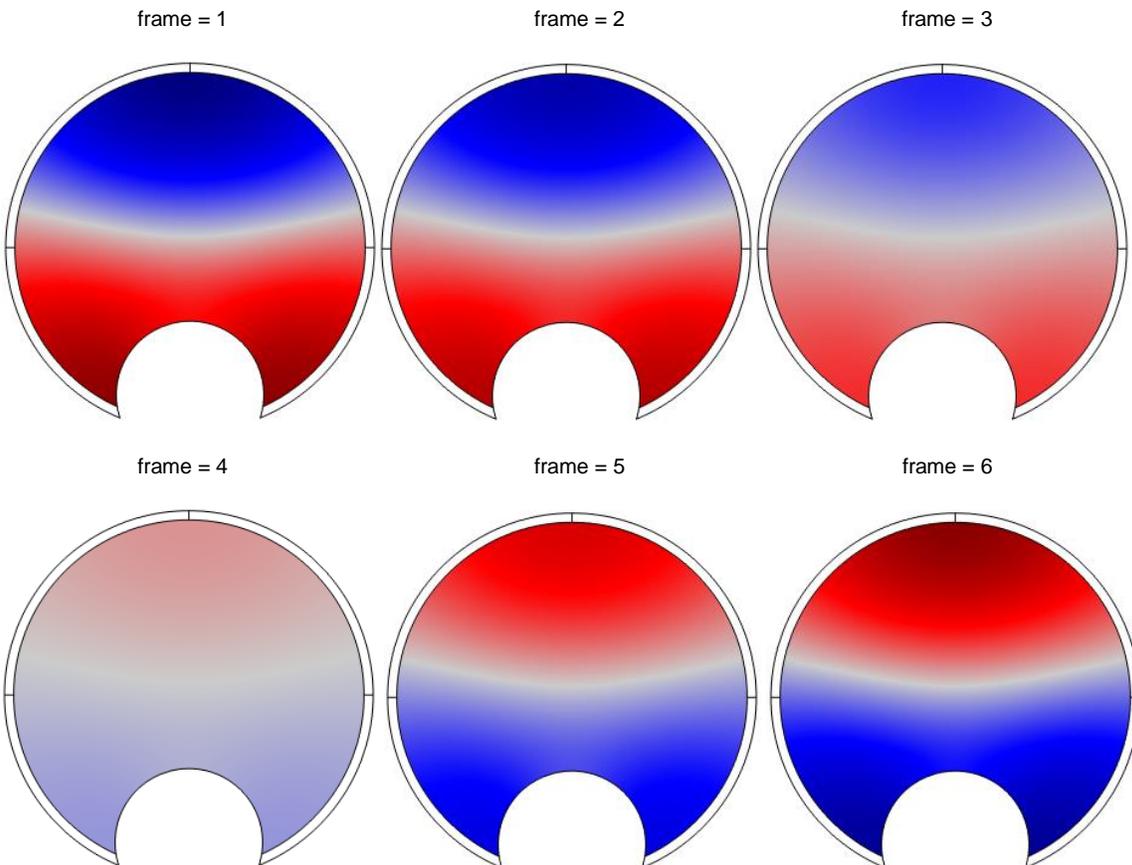
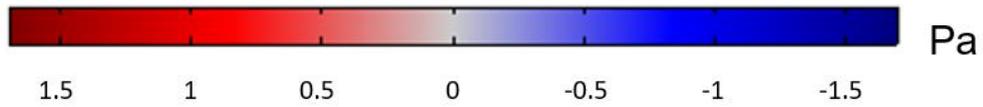
Formas de los modos acústicos y su efecto sobre la presión del fluido visto desde la sección transversal.



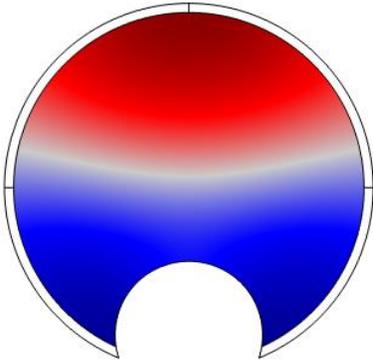


Anexo 7

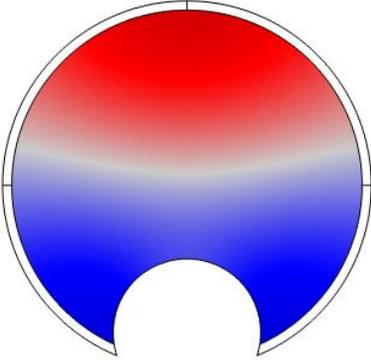
Formas de los modos acústicos y su efecto sobre la presión del fluido visto desde la sección transversal, la cual incluye una deformación semicircular.



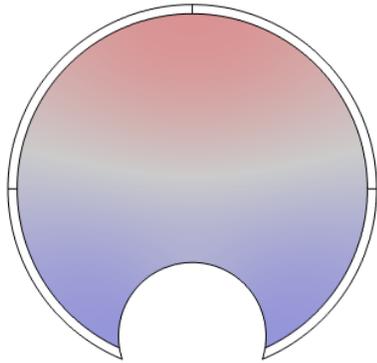
frame = 7



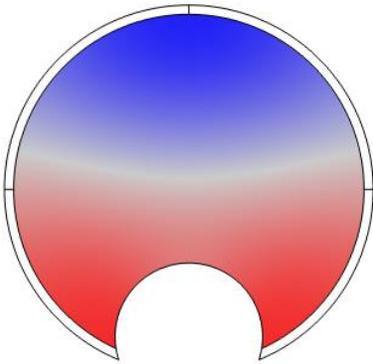
frame = 8



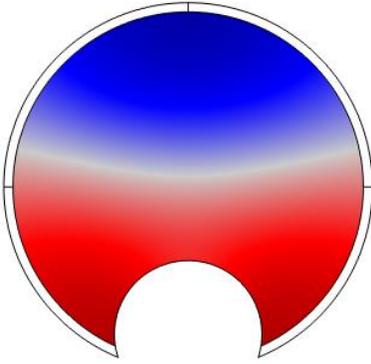
frame = 9



frame = 10



frame = 11



Referencias bibliográficas

- Adell, C., Claver, E., Purig, M., Garrido, M., Prat, A., & Oromi, J. (2000). La determinación del antígeno prostático específico en la prevención del cáncer de próstata. *Medicina Integral*, 36(6), 199–235. <https://www.elsevier.es/es-revista-medicina-integral-63-articulo-la-determinacion-del-antigeno-prostatico-15338>
- Alonso-Sandoica, E., Jara-Rascón, J., Martínez-Salamanca, J. I., & Hernández-Fernández, C. (2006). Validez diagnóstica del tacto rectal en la era del antígeno específico de la próstata. *Atencion Primaria*, 37(1), 9–14. <https://doi.org/10.1157/13083938>
- American Cancer Society. (2012). *Datos y Estadísticas sobre el cáncer entre los Hispanos/Latinos*.
- American Cancer Society. (2019). *What Is Prostate Cancer?* <https://www.cancer.org/cancer/prostate-cancer/about/what-is-prostate-cancer.html>
- Ankerst, D. P., & Thompson, I. M. (2006). Sensitivity and specificity of prostate-specific antigen for prostate cancer detection with high rates of biopsy verification. *Archivio Italiano Di Urologia e Andrologia*, 78(4), 125–129. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17269614/>
- Berrocal, T., López-Pereira, P., Arjonilla, A., & Gutiérrez, J. (2002). Anomalies of the distal ureter, bladder, and urethra in children: Embryologic, radiologic, and pathologic features. *Radiographics*, 22(5), 1139–1164. <https://doi.org/10.1148/radiographics.22.5.g02se101139>
- Bobé-Armant, F. (2006). Diagnostic validity of rectal touch. In *Atencion Primaria* (Vol. 37, Issue 1, pp. 14–15). Ediciones Doyma, S.L. <https://doi.org/10.1157/13083948>
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2012a). Flujo en tuberías. In *Mecánica de fluidos Fundamentos y aplicaciones* (Segunda ed, pp. 337–417). McGraw Hill Education.
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2012b). Patrones de flujo y visualización de flujo. In *Mecánica de fluidos Fundamentos y aplicaciones* (Segunda ed, pp. 139–149). McGraw Hill Education.
- Centers for Disease Control and Prevention. (2020). *Prostate Cancer*. <https://www.cdc.gov/cancer/prostate/index.htm>
- Colli, E., Artibani, W., Goka, J., Parazzini, F., & Wein, A. J. (2003). Are urodynamic tests useful tools for the initial conservative management of non-neurogenic urinary incontinence? A review of the literature. *European Urology*, 43(1), 63–69. [https://doi.org/10.1016/S0302-2838\(02\)00494-3](https://doi.org/10.1016/S0302-2838(02)00494-3)
- Colmener, L., Troconis, E., Cornejo, F., Noboa, A., Oswaldo, R., & Lupera, H.

- (2018). Aplicación de la Tomografía por emisión de positrones en el cáncer de próstata marcado con 68 Ga-PSMA: Revisión y actualidad. *Federación Ecuatorina de Radiología e Imagen*, 11(1), 13–20.
- Cruz García-Villa, P., Figueroa-Zarza, M., López-Alvarado, D., & Mendoza-Peña, F. (2013). Utilidad ultrasonido uretral en estenosis de uretra. *Revista Mexicana de Urología*, 73(4), 180–186. <https://www.elsevier.es/es-revista-revista-mexicana-urologia-302-pdf-X2007408513267863>
- Delgado-Quiñones, E. G., Pulido-Guerrero, C., Navarro-Sandoval, C., Rivera-Valdivia, W., & Sahagún-Cuevas, M. N. (2015). Prevalencia de síntomas prostáticos en pacientes mayores de 60 años en una unidad de medicina familiar. *Revista Médica MD*, 5(04), 141–150. www.revistamedicamd.com
- Díaz-Rodríguez, N., Garrido-Chamorro, R. P., & Castellano-Alarcón, J. (2007). Methodology and Techniques. Ultrasonography: Scientific bases, ultrasonographs and ultrasonographic language. *Semergen*, 33(7), 362–369. [https://doi.org/10.1016/S1138-3593\(07\)73916-3](https://doi.org/10.1016/S1138-3593(07)73916-3)
- Dirección General de Información en Salud. (2018). *Indicadores de Inclusión Social*. http://www.dgis.salud.gob.mx/contenidos/basesdedatos/indicadores_inclusion_social_gobmx.html
- Filella, X., Alcover, J., Molina, R., Rodríguez, A., Carretero, P., & Ballesta, A. M. (1997). Clinical evaluation of free PSA/total PSA (prostate-specific antigen) ratio in the diagnosis of prostate cancer. *European Journal of Cancer Part A*, 33(8), 1226–1229. [https://doi.org/10.1016/S0959-8049\(97\)00081-6](https://doi.org/10.1016/S0959-8049(97)00081-6)
- Franzini, J. B., & Finnemore, E. J. (1999). Principios básicos del flujo fluido. In *Mecánica de Fluidos con aplicaciones en la Ingeniería* (Novena edi, pp. 68–69). McGraw Hill Education.
- García-Guerrero, V. M. (2014). Pronóstico estocástico de la población mexicana utilizando modelos de datos funcionales. *Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 5(3), 18–33. https://www.inegi.org.mx/rde/rde_13/doctos/rde_13_art2.pdf
- Geavlete, P., Muțescu, R., Drăguțescu, M., Georgescu, D., & Geavlete, B. (2016). Endoscopic Treatment of Urethral Tumors. In *Endoscopic Diagnosis and Treatment in Urethral Pathology* (pp. 129–149). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-802406-5.00007-0>
- Gorriño, M., Miren Ibáñez-Zubiarrain, A., Oleaga, L., Gorriño, O., Gómez-García, E., & Grande, D. (2005). La uretrografía como método diagnóstico en la patología benigna uretral. *Radiología*, 47(5), 257–262. [https://doi.org/10.1016/S0033-8338\(05\)72845-9](https://doi.org/10.1016/S0033-8338(05)72845-9)
- Harvard Medical School. (2019). *Urethritis*. Harvard Health Publishing. https://www.health.harvard.edu/a_to_z/urethritis-a-to-z

- Harvey, H., & deSouza, N. M. (2016). The role of imaging in the diagnosis of primary prostate cancer. *Journal of Clinical Urology*, 9(2_suppl), 11–17. <https://doi.org/10.1177/2051415816656120>
- Hutter, K., & Wang, Y. (2016). Hydrodynamics of ideal liquids. In *Fluids and Thermodynamics Volume 1: Basic Fluid Mechanics* (pp. 64–73). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-33633-6>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2015). Población. *Censos y Conteos. Población y Vivienda*.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2018). *COMUNICADO DE PRENSA NÚM. 525/18*.
- Instituto Nacional del Cáncer. (2010). *Informes de patología*. <https://www.cancer.gov/espanol/cancer/diagnostico-estadificacion/diagnostico/hoja-informativa-informes-de-patologia#cmo-se-analiza-el-tejido-despus-de-una-biopsia-o-una-ciruga-qu-es-un-corte-congelado>
- Instituto Nacional del Cáncer. (2019, April 9). *Exámenes de detección del cáncer de próstata*. <https://www.cancer.gov/espanol/tipos/prostata/paciente/deteccion-prostata-pdq>
- Instituto Nacional del Cáncer. (2020a). *Tratamiento del cáncer de pene*. <https://www.cancer.gov/espanol/tipos/pene/pro/tratamiento-pene-pdq>
- Instituto Nacional del Cáncer. (2020b). *Tratamiento del cáncer de uretra*. <https://www.cancer.gov/espanol/tipos/uretra/paciente/tratamiento-uretra-pdq>
- International Agency for Research on Cancer. (2019). Cancer Tomorrow. In *World Health Organization (WHO)* (pp. 1–2). https://gco.iarc.fr/tomorrow/en/dataviz/bars?sexes=1&single_unit=50000&cancers=27&types=1&populations=484&mode=population
- Jalón Monzón, A., Fernández Gómez, J. M., Rodríguez Faba, O., García Rodríguez, J., Rodríguez Martínez, J. J., González Álvarez, R. C., Álvarez Múgica, M., & Regadera Sejas, F. J. (2005). Relación entre síntomas del tracto urinario inferior y calidad de vida. In *Archivos Espanoles de Urología* (Vol. 58, Issue 2, pp. 109–113). <https://doi.org/10.4321/s0004-06142005000200003>
- Lippert, H. (2002). *Anatomía Estructura y Morfología del Cuerpo Humano* (4a Edición). Marban Libros S.L.
- López Chente-Casado, J., Soto-Guzmán, A., Candia-Plata, M. del C., Arriaga-Aguilar, J., Camacho-Villa Alma, Y., & García-Vásquez, R. A. (2013). Valor clínico del tacto rectal y antígeno prostático específico en la detección oportuna del cáncer de próstata en Hermosillo, Sonora. *Revista Mexicana de Urología*, 73(6), 299–306. <https://www.elsevier.es/es-revista-revista-mexicana->

urologia-302-pdf-X200740851372344X

- Mangera, A., Patel, A. K., & Chapple, C. R. (2010). Anatomy of the lower urinary tract. *Surgery (Oxford)*, 28(7), 307–313. <https://doi.org/10.1016/j.mpsur.2010.03.002>
- Maričić, A., Valenčić, M., Sotošek, S., Oguić, R., Ivančić, A., & Ahel, J. (2010). Transrectal sonography in prostate cancer detection - Our 25 years experience of implementation. *Collegium Antropologicum*, 34(SUPPL. 2), 239–242. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21305738/>
- Márquez Heine, J. C., Rojas Buendía, L., Ávila Arroyo, N., Pacheco Gahbler, C., & Calderón Ferro, F. (2005). El costo del cáncer de próstata. ¿Qué esperamos? *Revista Mexicana de Urología*, 65(5), 307–311. www.imbiomed.com
- McAninch, J. W., & Lue, T. F. (2014). *Urología general* (18a edició). McGraw Hill Education.
- McFarlane, M. J. (1990). The Rectal Examination. In *Clinical Methods: The History, Physical, and Laboratory Examinations*. Butterworths. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21250264>
- Miller, K. D., Goding Sauer, A., Ortiz, A. P., Fedewa, S. A., Pinheiro, P. S., Tortolero-Luna, G., Martinez-Tyson, D., Jemal, A., & Siegel, R. L. (2018). Cancer Statistics for Hispanics/Latinos, 2018. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 68(6), 425–445. <https://doi.org/10.3322/caac.21494>
- Molina, R., Filella, X., & Ballesta, A. (2000). El antígeno prostático específico en el diagnóstico precoz del cáncer de próstata. *Medicina Integral*, 36(6), 199–202. <https://www.elsevier.es/es-revista-medicina-integral-63-articulo-el-antigeno-prostatico-especifico-el-15331>
- Munson, B. R., Okiishi, T. H., Huebsch, W. W., & Rothmayer, A. P. (2013a). Fluid Kinematics. In *Fundamentals of fluid Mechanics* (Seventh ed, pp. 162–166). Wiley.
- Munson, B. R., Okiishi, T. H., Huebsch, W. W., & Rothmayer, A. P. (2013b). Viscous flow in pipes. In *Fundamentals of fluid Mechanics* (Seventh ed, pp. 400–479). Wiley.
- Napal, S., & Giral, P. J. (2015). ¿hacia el fin de la era del antígeno prostático específico? In *Actas Urológicas Espanolas* (Vol. 39, Issue 9, p. 593). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.acuro.2015.04.004>
- National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering. (2019). *Imagen por Resonancia Magnética (IRM)*. <https://www.nibib.nih.gov/espanol/temas-cientificos/imagen-por-resonancia-magnetica-irm>
- National Institute of Diabetes Digestive and Kidney Diseases. (2014a). Prostate Enlargement: Benign Prostatic Hyperplasia. *National Kidney and Urologic Diseases Information Clearinghouse*. <https://www.niddk.nih.gov/health-information/urologic-diseases/prostate-problems/prostate-enlargement-benign->

prostatic-hyperplasia

- National Institute of Diabetes Digestive and Kidney Diseases. (2014b). Prostatitis: Inflammation of the Prostate. *National Kidney and Urologic Diseases Information Clearinghouse*, 1–10. <https://www.niddk.nih.gov/health-information/urologic-diseases/prostate-problems/prostatitis-inflammation-prostate>
- National Research Council (US) and Institute of Medicine (US) Committee on the Mathematics and Physics of Emerging Dynamic Biomedical Imaging. (1996). Mathematics and Physics of Emerging Biomedical Imaging. In National Academy of Sciences (Ed.), *Mathematics and Physics of Emerging Biomedical Imaging*. National Academies Press (US). <https://doi.org/10.17226/5066>
- Patient Information. (2017). *Penis cancer*. <https://patients.uroweb.org/cancers/penis-cancer/>
- Perera, M., Papa, N., Christidis, D., Wetherell, D., Hofman, M. S., Murphy, D. G., Bolton, D., & Lawrentschuk, N. (2016). Sensitivity, Specificity, and Predictors of Positive 68Ga–Prostate-specific Membrane Antigen Positron Emission Tomography in Advanced Prostate Cancer: A Systematic Review and Meta-analysis. In *European Urology* (Vol. 70, Issue 6, pp. 926–937). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.eururo.2016.06.021>
- Rodriguez, A., Criscuolo, G., González Calvo, S., Larrañaga, N., Gallo, J. C., & Kozima, S. (2013). Ecografía Y Biopsia Prostáticas En La Detección Del Carcinoma Prostático. *Revista Argentina de Radiología*, 77(3), 231–235. <https://doi.org/10.7811/rarv77n3a09>
- Salazar, M. P., & Castellanos, L. T. (2014). Urodynamic study. *Urología Colombiana*, 23(2), 128–138. [https://doi.org/10.1016/S0120-789X\(14\)50042-1](https://doi.org/10.1016/S0120-789X(14)50042-1)
- Secretaría de Salud. (2020). *Dirección General de Información en Salud | Secretaría de Salud | Gobierno | gob.mx*. <https://www.gob.mx/salud/acciones-y-programas/direccion-general-de-informacion-en-salud-dgis>
- Secretaría de Salud. (2015). *Informe sobre la Salud de los de los Mexicanos*.
- Shahsavari, R., Bagheri, S. M., & Iraj, H. (2017). Comparison of diagnostic value of sonourethrography with retrograde urethrography in diagnosis of anterior urethral stricture. *Macedonian Journal of Medical Sciences*, 5(3), 335–339. <https://doi.org/10.3889/oamjms.2017.073>
- Siegel, R. L., Miller, K. D., & Jemal, A. (2019). Cancer statistics, 2019. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 69(1), 7–34. <https://doi.org/10.3322/caac.21551>
- Swift, S. E., & Ostergard, D. R. (1995). Evaluation of current urodynamic testing methods in the diagnosis of genuine stress incontinence. *Obstetrics and Gynecology*, 86(1), 85–91. [https://doi.org/10.1016/0029-7844\(95\)00106-2](https://doi.org/10.1016/0029-7844(95)00106-2)
- Terris, M. K. (1999). Sensitivity and specificity of sextant biopsies in the detection of prostate cancer: Preliminary report. *Urology*, 54(3), 486–489.

[https://doi.org/10.1016/S0090-4295\(99\)00148-X](https://doi.org/10.1016/S0090-4295(99)00148-X)

- Tresguerres, J., Ariznavarreta, C., Chachofeiro, V., Cardinali, D., Escrich, E., Loyzaga, P., Lahera, V., Mora, F., Romano, M., & Tamargo, J. (2005). *Fisiología Humana* (3a edición). McGraw-Hill Interamericana.
- Tritschler, S., Roosen, A., Füllhase, C., Stief, C. G., & Rübber, H. (2013). Urethral Stricture: Etiology, Investigation and Treatments. *Deutsches Ärzteblatt International*, 110(13), 220–226. <https://doi.org/10.3238/arztebl.2013.0220>
- Velarde Ramos, L., & Gomez Illanes, R. (2018). Estrechez o estenosis uretral. *Revista Cubana de Urología*, 7(2), 131–147. <http://www.revurologia.sld.curcurologia@infomed.sld.cu>
- Vergara Méndez, V., & Bautista-Samperio, L. (2002). Severidad de sintomatología prostática: encuesta de pacientes entre 40-60 años. *Revista Facultad de Medicina UNAM*, 50(004), 162–166. www.medspain.com/ant/n
- Vilanova, J. C., Comet, J., Garcia-Figueiras, R., Barceló, J., & Boada, M. (2010). Utilidad de la resonancia magnética en el cáncer de próstata. *Radiología*, 52(6), 513–524. <https://doi.org/10.1016/j.rx.2010.06.003>
- Wang, M. H. (2010). Surgical management of meatal stenosis with meatoplasty. *Journal of Visualized Experiments*, 45(45). <https://doi.org/10.3791/2213>
- World Health Organization. (2020). Cancer Country Profile 2020 - Mexico. *World Health Organization (WHO)*, July, 2019–2020. https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_docman&view=download&category_slug=4-cancer-country-profiles-2020&alias=51536-mexico-cancer-profile-2020&Itemid=270&lang=es