



## Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: [www.riit.com.mx](http://www.riit.com.mx)

### Modelo Sistémico para el estudio de variables biomecánicas que influyen en el desarrollo de úlceras por presión

### Systemic Model for the study of biomechanical variables that influence the development of pressure ulcers

Alemán-Pérez, A.<sup>1</sup>, Araujo-Monsalvo, V.M.<sup>2</sup>, Hernández-Simón, L.M.<sup>1</sup>, Gayol-Mérida, D.A.<sup>3</sup>, Domínguez-Hernández, V.M.<sup>2,4</sup>, Hernández-Aguilar, C.<sup>1</sup>, Martínez-Coria, E.<sup>2</sup>, Luna-Méndez, M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO.

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Rehabilitación LGII, MÉXICO.

<sup>3</sup> C.N.M.A.I.C.R.I Educativa “Gaby Brimmer”, MÉXICO.

<sup>4</sup> Tecnológico de Monterrey, Campus CCM.

[dinelya01@gmail.com](mailto:dinelya01@gmail.com); [vicaraujom@yahoo.com.mx](mailto:vicaraujom@yahoo.com.mx); [hsimon@ipn.mx](mailto:hsimon@ipn.mx); [dgayolmerida@gmail.com](mailto:dgayolmerida@gmail.com); [vm\\_dominguez@yahoo.com.mx](mailto:vm_dominguez@yahoo.com.mx); [clhernandez@ipn.mx](mailto:clhernandez@ipn.mx); [emartinez@inr.gob.mx](mailto:emartinez@inr.gob.mx); [martyn.luna@hotmail.com](mailto:martyn.luna@hotmail.com)

**Innovación tecnológica:** Grado de daño en tejido e identificación de úlceras internas y externas.

**Área de aplicación industrial:** Salud.

Recibido: 24 junio 2022

Aceptado: 01 agosto 2022

#### Abstract

This study addresses the problem of pressure ulcers, which are skin lesions resulting from a disease or condition involving lack of movement or sensory perception. Their appearance generates repercussions in terms of health, psychological, family, economic and social deterioration. The aim of this research is to develop a systemic model that allows the study of the variables that influence the development of these injuries. The hypothesis of this work is that at least one of these factors will be found to have a statistically significant influence on the injury risk indicators. The research process was carried out using the Transdisciplinary Systemic Methodology, by means of which the variables to be studied were identified. Body Mass Index, type of tissue and previous damage, and how they are related in the process of injury was analyzed. During the experimental phase, a Biomechanical model was developed using the Finite Element Method, in which different levels for BMI (thin, standard and obese), tissue type (bone, muscle, fat and skin) and the damage (6 levels based on the NPUAP classification of pressure injuries) were considered. Stress and

displacement values were chosen as indicators of risk of tissue damage. A multifactorial ANOVA and Multiple Range test were performed for both efforts and displacements and the results indicate that all three variables have a statistically significant influence for both indicators. It was concluded that models of this type can be used to evaluate surfaces, materials and support surfaces designs, giving the possibility to generate more options for users and contribute to the prevention of pressure ulcers.

**Key words:** Finite Element Method, Transdisciplinary Methodology, Pressure Ulcers.

## Resumen

En el presente estudio se aborda el problema de las úlceras por presión, las cuales son lesiones en la piel, derivadas de algún padecimiento o condición que implique falta de movimiento o de percepción sensorial. Su aparición genera repercusiones tanto en el deterioro de la salud como psicológicas, familiares, económicas y sociales. El objetivo de esta investigación es desarrollar un modelo Sistémico que permita el estudio de las variables que influyen en el desarrollo de dichas lesiones. La hipótesis del trabajo es que se encontrará que al menos uno de estos factores presente influencia estadísticamente significativa en los indicadores de riesgo de daño. El proceso de investigación se llevó a cabo utilizando la Metodología Sistémica Transdisciplinaria. mediante la cual se pudieron identificar las variables a estudiar que fueron: Índice de Masa Corporal, tipo de tejido y daño previo y se analizó cómo se relacionan en el proceso de formación de lesiones. Durante la fase experimental se desarrolló un modelo Biomecánico por medio del Método del Elemento Finito, en el que se consideraron diferentes niveles para el IMC (delgado, estándar y obeso), el tipo de tejido (hueso, músculo, grasa y piel) y el daño (6 niveles con base en la clasificación NPUAP de las úlceras por presión). Los valores de esfuerzos y desplazamientos se eligieron como indicadores de riesgo de daño en el tejido. Se realizó un ANOVA multifactorial y prueba de Múltiples Rangos tanto para esfuerzos como para desplazamientos y los resultados indican que las tres variables tienen influencia estadísticamente significativa para ambos indicadores. Se llegó a la conclusión de que se pueden utilizar modelos de este tipo para evaluar superficies, materiales y diseños de superficies de soporte, dando la posibilidad de generar más opciones para los usuarios y contribuir en la prevención de las úlceras por presión.

**Palabras clave:** Método del Elemento Finito, Metodología Transdisciplinaria, Úlceras por presión.

## I. INTRODUCCIÓN

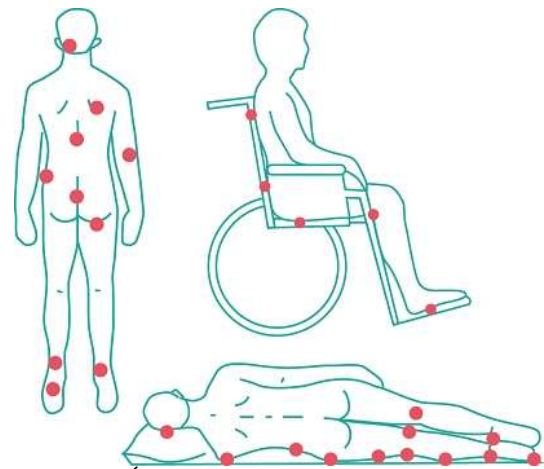
Una úlcera por presión (UPP) puede ser entendida como el daño localizado en un área específica de la piel y el tejido blando adyacentes a una prominencia ósea (Véase Fig. 1). Puede encontrarse con o sin pérdida de piel y otros tejidos y puede causar dolor. Estas heridas aparecen como consecuencia de

presión intensa y/o prolongada combinada con fuerzas de cizallamiento. La nutrición, las comorbilidades, la condición del tejido, la perfusión y el microclima son factores que pueden repercutir en la cantidad de presión y fuerzas cortantes que es capaz de soportar el tejido[1].



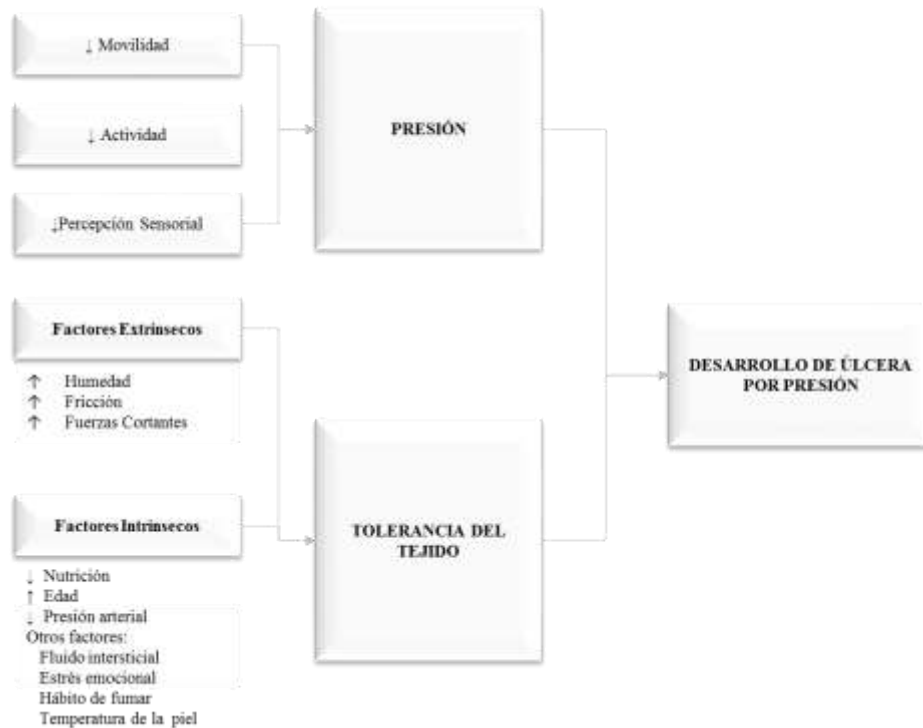
**Figura 1.** Ilustración sobre una úlcera por presión y las áreas donde aparecen [2].

Las úlceras por presión suelen ser un padecimiento secundario de algún otro problema o condición que implique falta de movimiento o de percepción sensorial, como se muestra en la Fig. 2. Por tanto, la población en riesgo incluye a los adultos mayores, mientras que los pacientes menores de 70 años que desarrollan esta complicación son por lo general lesionados medulares, personas parapléjicas, personas con esclerosis múltiple y otros pacientes neurológicos; pacientes por traumatismo y, en general, toda aquella persona con alguna condición que limite la habilidad de moverse libremente en respuesta a la percepción del dolor o incomodidad [1], [3].



**Figura 2.** Áreas en que aparecen comúnmente las úlceras por presión en personas con movilidad limitada [4].

Si bien la falta de movilidad y percepción sensorial definen la población con riesgo, existe una lista numerosa de factores que contribuyen a la formación de úlceras por presión. Dichos factores se clasifican en intrínsecos y extrínsecos. Los factores intrínsecos son aquellos que se derivan de las condiciones propias del paciente, tales como la falta de movilidad, nutrición y percepción sensorial. Los factores extrínsecos son aquellos que dependen del entorno del paciente, tales como la humedad, la fricción, y las fuerzas cortantes.



**Figura 3.** Esquema de factores que contribuyen a la formación de úlceras por presión [3].

Esta clasificación hecha por Braden y Bergstrom, sirvió de punto de partida para el desarrollo de escalas de riesgo, las cuales son utilizadas por el personal de salud para cuantificar un rango de factores de riesgo de un paciente y así tomar las acciones correspondientes. Entre los factores que se consideran dichas escalas puede estar: movilidad, actividad, estado nutricional, estado mental, incontinencia, apariencia física general, apariencia de la piel, medicación, fricción, peso, edad, dolor, percepción sensorial, humedad, grado de conciencia, balance, dieta, signos vitales, entre otros [3].

El principal factor asociado a este tipo de lesiones es la presión intensa y/o prolongada causada por el peso corporal sobre el tejido blando cercano a las prominencias óseas, lo cual resulta en oclusión de los vasos sanguíneos que proveen nutrientes al tejido, generando la muerte del tejido, o necrosis. Otro factor es la tolerancia del tejido a la presión, la cual está influenciada por factores

como la humedad, fricción y fuerzas cortantes en la piel, así como el estado nutricional, los efectos fisiológicos del estrés y la edad. Los factores de riesgo han sido objeto de estudio tanto en estudios clínicos como en pruebas experimentales.

Dentro de los estudios clínicos se encuentra el trabajo realizado por Kayser et. al [5], quienes realizaron un estudio sobre predictores de lesiones por presión severas en una muestra de 216,626 pacientes hospitalizados debido a una UPP o que desarrollaron una UPP durante su hospitalización. Se observó la prevalencia de las úlceras superficiales y aquellas que presentaban daño severo, así como el efecto que tienen la Edad avanzada, el género, la incontinencia, los períodos largos de inmovilidad, estar en unidades de cuidados intensivos, y el Índice de Masa Corporal (IMC). De acuerdo con este estudio, todos los factores anteriormente mencionados fueron identificados como predictores con un riesgo significativo. Asimismo, se identificó que la prevalencia de las lesiones severas no se

había reducido, lo cual sugiere que las técnicas actuales de prevención pueden no prevenir adecuadamente las lesiones severas. Por último, también se encontró que la probabilidad de desarrollar algún tipo de lesión por presión cuando se está hospitalizado aumenta conforme el IMC se acerca a los extremos, es decir, a la delgadez extrema u obesidad. Dichas conclusiones coinciden con los resultados obtenidos en el estudio multicéntrico de Kottner et al. [6] realizado en Alemania sobre la relación del IMC y la formación de UPPs. Encontraron que los pacientes hospitalizados con bajo IMC presentan una mayor propensión a desarrollar úlceras por presión, seguidos de los pacientes con obesidad. De acuerdo con este estudio existe una fuerte relación entre los pacientes con IMC extremos y el desarrollo de lesiones, esto puede deberse en parte a la nutrición, riesgo a infecciones, problemas de cicatrización, enfermedades metabólicas y la carga en los tejidos subyacentes a las prominencias óseas derivada del peso corporal. Los trabajos arriba citados, se realizaron con la suposición de que el tejido subyacente a las tuberosidades isquiáticas se encuentra íntegro y sin ningún daño.

Entre los estudios experimentales es notable la simulación hecha por Linder-Ganz y Gefen [6], [7], quienes desarrollaron un algoritmo para acoplar un modelo de Elementos Finitos de la zona pélvica con un umbral de lesión para el músculo esquelético, bajo la premisa que el músculo aumenta su rigidez cuando se encuentra atrofiado. Este modelo se basó en cómo influía el grado de daño, simulándolo como endurecimiento del músculo. Sin embargo, en este estudio no se toma en cuenta la influencia del peso corporal, además de que, tanto en úlceras superficiales como internas, se observa pérdida del tejido, variable que no es considerada en ninguno de los estudios consultados.

Como se ha mencionado antes, la aparición de lesiones por presión es multifactorial, y dichos factores incluyen tanto características del paciente, como del ambiente, no sólo físicas sino también psicológicas, económicas y sociales. Aunque su aparición suele atribuir a la atención recibida ya sea en casa o en hospitales, donde la incidencia de estas lesiones se toma como un indicador de Calidad [8], es necesario la detección de factores de riesgo y aplicar las medidas correspondientes.

Debemos tomar en cuenta que, en México, siendo un país en vías de desarrollo, no se tiene una cultura preventiva en cuestiones de salud por parte de sus habitantes. Esto tiene como resultado que las personas cuando sufren de algún padecimiento o lesión de salud, en primera instancia acuden a terceras personas que creen tener algún conocimiento médico y sólo agudizan el padecimiento.

Con la finalidad de proponer herramientas que ayuden a su prevención y tratamiento, como la mejora en los diseños de asientos, colchones y sillas de ruedas, este proyecto se enfoca al estudio de las variables que interactúan y contribuyen en el deterioro del tejido conformando el sistema que genera las úlceras por presión, con el fin de tener un acercamiento a dicho fenómeno.

La visión sistémica focaliza el objeto a estudiar como parte de un sistema cuyos elementos interactúan con éste y que tienen influencia sobre su comportamiento considerando distintos niveles holísticos, y pudiendo determinar la influencia de cada factor en la aparición de úlceras, así como estudiar las interacciones que hay entre factores. Debido a esto, se recurrió a la perspectiva sistémica y en particular a la Metodología Sistémica Transdisciplinaria [9], la cual permite ubicar el problema dentro de su contexto identificando los factores que influyen en el mismo e integra distintas

disciplinas para llevar a cabo una investigación experimental cuyos resultados permitan evaluar el impacto del estudio en el mundo real.

Sin embargo, la principal complicación para realizar este estudio es que se requerirían mediciones in vivo, lo que significaría la instrumentación de un paciente que curse una lesión por presión de preferencia en un estadio avanzado. Esto es prohibitivo de acuerdo a la Ley General de Salud [10], la cual, en el Artículo 100 alude a que preferentemente se debe tomar otras instancias de ser posible antes de llegar a la experimentación con seres humanos.

Por esta razón se propone otro tipo de abordaje al problema, representando el sistema por medio de un modelo. La ventaja de utilizar modelos es que éstos están basados en supuestos que simplifican la realidad para obtener una representación del fenómeno que facilita su entendimiento y de los principios que lo rigen; reducen costos y en caso de que se cometa algún error durante las pruebas a las que se va a someter el modelo, éste se corrige con el mínimo consumo de recursos [11]. En el caso del uso de modelos computarizados, tienen la ventaja de poder realizar pruebas con distintos materiales y cambiar las condiciones iniciales con lo que se simulan distintas situaciones.

## II. OBJETIVOS

El objetivo de esta investigación es desarrollar un modelo Sistémico que permita

el estudio de las variables que influyen en el desarrollo de úlceras por presión mediante una visión sistémica transdisciplinaria. Para lo cual es necesario identificar las variables relevantes para la construcción del modelo, aplicar la visión sistémica transdisciplinaria para diseñar un modelo sistémico biomecánico y diseñar un experimento para relacionar las variables del modelo con uno o más factores de riesgo de desarrollo de úlceras por presión.

Se espera encontrar que existe influencia estadísticamente significativa entre al menos una de las variables arrojadas por el análisis sistémico (peso, tipo de tejido y nivel de daño) y el riesgo de desarrollo de lesiones por presión.

## III. METODOLOGÍA

Como se mencionó anteriormente, el problema se abordó mediante la Metodología Sistémica Transdisciplinaria, la cual toma en cuenta tanto los puntos de vista de los actores del problema, como de los especialistas, logrando así una colaboración transdisciplinaria para describir el problema, así como para proponer una solución al mismo.

Las fases fundamentales del proceso transdisciplinario de investigación, de acuerdo con Hernández [9] son: investigación de campo, documental y contextual, sujeto que investiga, investigación experimental e investigación de Impactos, como se ilustra en la Fig. 4.



**Figura 4.** Fases de la Metodología Transdisciplinaria (Elaboración propia, con base en Hernández, 2018 [9]).

### A. Investigación de campo y documental

La primera fase de la metodología está relacionada con el problema a abordar, en recolectar toda la información necesaria para conocer el problema. El propósito de esta fase es contextualizar y obtener evidencia del problema, así como conocer los diferentes enfoques para la solución de este, actividades que dan pie a la descripción del objeto de estudio y culminan en la determinación de la alternativa de solución.

Por tanto, lo primero es conocer el Contexto físico del problema. Ya que las úlceras por presión afectan a las personas con limitaciones de movilidad, es un problema que afecta al mundo entero. Para conocer cómo afecta este problema a la población, se recurrió a un estudio mundial de prevalencia hospitalaria [12]. La Fig. 5 ilustra la focalización del problema, empezando de manera global, donde el 13.69% de los pacientes hospitalizados llega a desarrollar

úlceras por presión. En el continente americano es de 13.33% y en Norteamérica, la prevalencia es de 10.26%. El Boletín Epidemiológico de la Secretaría de salud [13], estimó una prevalencia del 12.92%, lo cual ubica al país por debajo del promedio mundial y a nivel continente. Sin embargo, a pesar de ser un problema con presencia importante en los centros de Salud, y que se considera un indicador de calidad en hospitales y clínicas, al consultar bases de datos de la misma secretaría de salud y buscar artículos sobre la prevalencia en México, no existen suficientes estudios que soporten esta cifra, por lo que los alcances e impactos de esta investigación se ven limitados por la falta de registros clínicos dentro y fuera de las instituciones de salud. Las lesiones por presión son un efecto secundario de un estado de falta de movilidad cuyo reporte ha sido deficiente desde ya años atrás, por lo cual es necesario mantener un registro adecuado para poder comprender la magnitud del problema y actuar en consecuencia.



**Figura 5.** Prevalencia de úlceras por presión según la ubicación geográfica según Al-Mutairi y Heindri [12].

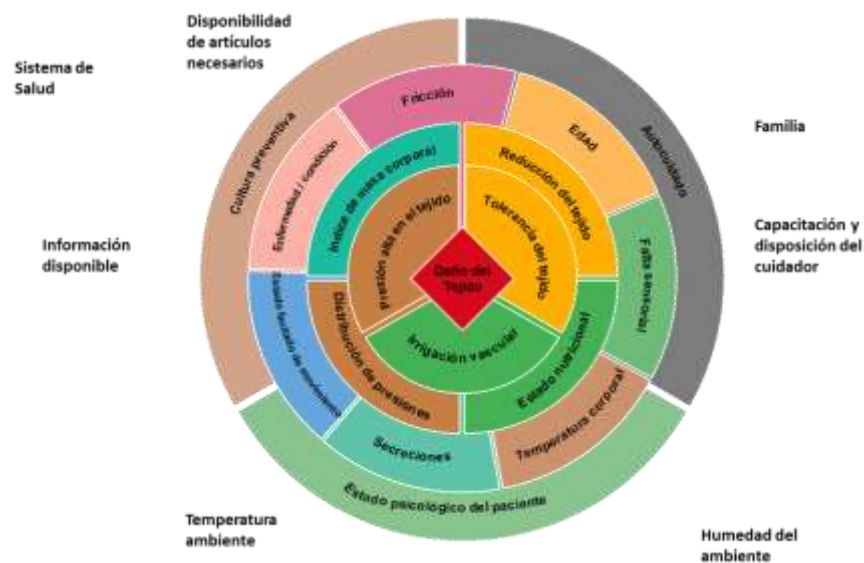
Después de ubicar el problema en el contexto físico, se procedió a describir la problemática desde el punto de vista de las variables que participan en el problema. Tomando en cuenta el contexto del desarrollo de las úlceras por presión, se puede decir que éste es un problema multifactorial en el que no solamente influye el hecho que el tejido se dañe, sino que hay varios aspectos físicos,

psicológicos, sociales y económicos que afectan al paciente, los cuales afectan directa o indirectamente en el daño del tejido.

En la Fig. 6 se observa el sistema de formación de úlceras por presión representado en distintos niveles. Comenzamos con el entorno del individuo, en el que existen factores sociales (como el

sistema de salud, la información disponible, y la disponibilidad de artículos necesarios), interpersonales (tales como la relación que tenga el paciente con su familia y con su cuidador) y físicos (como la temperatura y la humedad ambiente), los cuales influyen en el problema ya que pueden interactuar con factores físicos y psicológicos del individuo. Como sistema de formación de úlceras tomamos al propio individuo, en el cual identificamos 4 niveles de factores que repercuten en el daño del tejido: en el primer

nivel encontramos factores psicológicos que influyen en cómo lleva el paciente su tratamiento y el cuidado de su herida. En el segundo nivel encontramos los factores físicos que interactúan con el medio ambiente, tal como la temperatura corporal, la fricción y la falta sensorial. En el tercer nivel encontramos variables que repercuten directamente sobre el tejido y su tolerancia tales como el IMC, la reducción del tejido, la distribución de presiones y el estado nutricional del individuo.

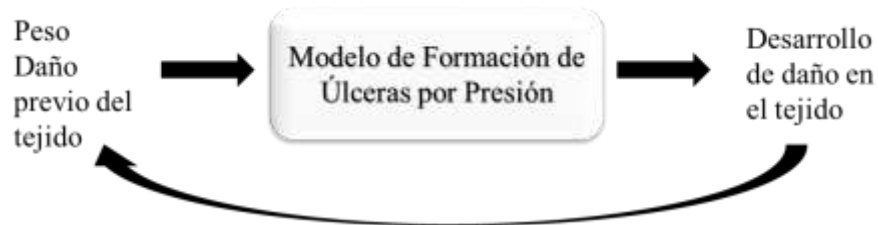


**Fig. 6** Representación holística de las variables que participan en el desarrollo de úlceras por presión (Elaboración propia, 2021).

De esta manera, en el cuarto y último nivel encontramos que existen variables que desempeñan un papel bastante importante dentro de este sistema de desarrollo de daño del tejido: la presión, la tolerancia del tejido, y la irrigación vascular. Se puede decir que la irrigación vascular, aparte de depender de la presión arterial del individuo, depende también de la presión existente en el área, ya que, si ésta rebasa la presión que ejerce la sangre dentro de los vasos sanguíneos, éstos se ocluirán, provocando falta de irrigación lo que desemboca en el inminente daño del tejido.

Así que se consideran variables principales la presión, la tolerancia del tejido, y el mismo daño existente en el tejido contribuyendo el resto de las variables, a éstas tres y de esta manera vemos como todas las variables de afuera hacia adentro se combinan para contribuir al daño del tejido el cual es el problema principal. Así se hizo la elección de estas variables para poder plantear una propuesta de modelo que nos ayude a comprender cómo interactúan dentro del sistema de úlceras de presión, lo cual nos lleva al final de la primera fase que es la determinación de la propuesta de solución, la cual se plantea en la Fig. 7.





**Figura 7.** Propuesta de Solución: Modelo de Formación de Úlceras por presión (Elaboración propia, 2021).

En dicha propuesta de solución, como primera aproximación se pensó en crear un modelo que tuviera como entrada las variables previamente seleccionadas que son el peso y el daño existente en el tejido, dicho modelo tendrá como salida indicadores de desarrollo de daño en el mismo tejido, lo cual indica que el sistema tiene realimentación. Así mismo se analizó la influencia que tiene cada variable en el desarrollo de daño.

### ***B. Auto-Investigación.***

La segunda fase de la Metodología Transdisciplinaria se enfoca en la auto investigación. Ya que el proceso de investigación requiere dedicación y esfuerzo, el sujeto que investiga debe estar enfocado, consciente de sus fortalezas y debilidades y en búsqueda constante de mejora, por lo que esta fase se enfoca en la persona que lleva a cabo la investigación, contextualizando, evaluando y analizándola para propiciar el desarrollo de sus capacidades, actitudes transdisciplinarias y aprendizaje.

Lo primero fue definir el contexto físico del investigador, el cual delimita el contexto físico de la investigación misma. Se ubica en el continente americano, específicamente en el país de México, y la Ciudad de México, ya que el sujeto de estudio es alumna del Instituto Politécnico Nacional como alumna de maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas en la ESIME Zacatenco. También desarrolla el proyecto en colaboración en el Instituto Nacional de Rehabilitación, específicamente en el laboratorio de Biomecánica. Por lo cual se cuenta con un equipo de trabajo multidisciplinario con

alcance en las áreas de Ingeniería, Medicina e Informática.

Ya que se definieron las disciplinas que participan: Ingeniería, Medicina e Informática, se procedió a investigar las teorías, Métodos y Herramientas a utilizar (Véase Fig. 8). Tratándose de un proyecto transdisciplinario, dichos métodos y conocimientos forman parte de una o más disciplinas. Así, la Ingeniería y la Medicina colaboran aportando los principios de la mecánica aplicada en la anatomía humana y en la interacción interviene la Biomecánica. De la conjunción de la Medicina y la Informática se utilizaron los principios de Anatomía para la segmentación de Imágenes Biomédicas y de la interacción entre la Informática y los conocimientos de Ingeniería mecánica se utilizó un software para realizar simulaciones mecánicas.



**Figura 8.** Teorías, Métodos y Herramientas que se utilizaron en el proyecto (Elaboración propia, 2021).

### C. Investigación Experimental.

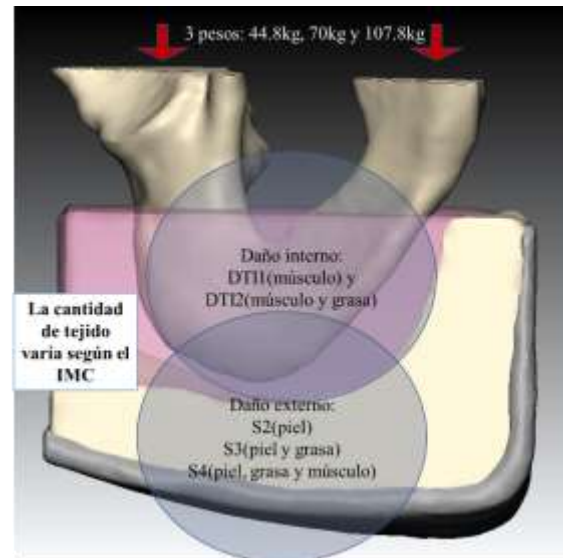
Ya que se obtuvo la propuesta de solución (como resultado de la primera fase) y se obtuvieron los métodos y teorías a utilizar (como resultado de la segunda fase), se continuó con la parte experimental, en la cual se desarrolló un modelo 3D que simula a un individuo sentado. Dicho modelo se sometió a una prueba de elementos finitos con el objetivo de observar el comportamiento entre variables dependientes e independientes. Las variables independientes empleadas en la prueba numérica se identificaron mediante el análisis hecho en la primera fase de la metodología, las cuales son: el peso del paciente, el tipo de tejido y el daño existente del tejido. Las variables dependientes son aquellas que el modelo arroja como resultado, es decir, los valores de esfuerzos y desplazamientos, los cuales indican probabilidad de daño en el tejido.

#### 1) Casos analizados.

Se desarrolló un modelo 3D que toma en cuenta las siguientes variables (Ver Fig. 9):

- El índice de masa corporal, el cual, al mantener la altura del sujeto de estudio en 1.70 m, se varió con tres pesos diferentes considerando la clasificación de la OMS de delgadez extrema, peso estándar y Obesidad tipo II (44.8 kg, 70 kg y 107.8 kg para la estatura especificada).
- El tipo de tejido, hueso, grasa y músculo. El grosor de grasa y músculo varió según la complejión del sujeto y fue calculado de acuerdo con el porcentaje correspondiente de músculo y grasa para cada clasificación.
- El grado de daño del tejido, para el cual se establecieron 6 grados: Sano, S2, S3, S4 (grados de ulceración superficial que afectan piel, piel-grasa y piel-grasa-músculo, respectivamente) y también DTI1 y DTI2 (grados de ulceración interna que afectan músculo y músculo-grasa respectivamente)

basados en la clasificación de la NPUAP y en las mediciones obtenidas por Donini et. Al y utilizadas en estudios previos [14].

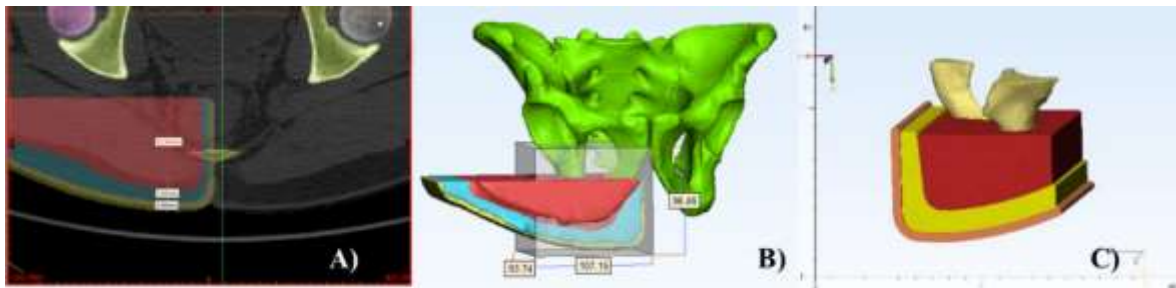


**Figura 9.** Variables consideradas en el modelo (Modelo hecho en In Vesalius ver. 3.1.1 (CTI Renato Archer, Campinas, SP, Brazil) y MeshMixer v3p5, Elaboración propia, 2021).

#### 2) Obtención del modelo 3D

Se obtuvieron cortes tomográficos de un paciente masculino, de 1.70 m de estatura y 70 kg de peso. El estudio se realizó en el Servicio de Tomografía Computada del Instituto Nacional de Rehabilitación, con un tomógrafo GE Light Speed de 64 cortes. Se obtuvieron imágenes a 0.625 mm, desde la cresta iliaca hasta la parte distal del fémur, en formato DICOM.

El modelo 3D se construyó mediante la segmentación de dichas imágenes en el programa In Vesalius ver. 3.1.1 (CTI Renato Archer, Campinas, SP, Brazil) diferenciando hueso, músculo, grasa y piel. Posteriormente con el programa MeshMixer v3p5 se alineó y recortó la estructura de la pelvis para simular la posición de sedestación, quedando como un ensamble de piezas independientes que son: la tuberosidad, el músculo, la grasa y la piel (Véase Fig. 10).



**Figura 10.** Proceso para la obtención del modelo 3D: A) Segmentación de Cortes tomográficos, B) Proceso de alineado y recorte de pelvis para la obtención de la posición de sedestación, C) Modelo de tejido sano, con IMC en valores normales (Modelo hecho en In Vesalius ver. 3.1.1 (CTI Renato Archer, Campinas, SP, Brazil) y MeshMixer v3p5, Elaboración propia, 2021).

### 3) *Análisis de Elementos Finitos.*

En total se generaron 18 mallas, cada una correspondiente a un caso independiente. Para la solución de cada caso, se importó la malla correspondiente al programa ANSYS v. 14.5 (ANSYS Inc., 2012). La cantidad de nodos y elementos variaba desde 40 000 hasta 50 000 elementos y de 10 000 hasta 12 000 nodos según el caso. Posteriormente, se procedió a asignar las propiedades de los materiales, las cuales se consideraron lineales, elásticas e isotrópicas, cuyos valores se encuentran detallados en la Tabla 1.

**TABLA 1.** PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.

Estructura	E [MPa]	$\nu$
Hueso	17000.00	0.30
Músculo	0.10	0.49
Grasa	0.03	0.49
Piel	0.20	0.49

Las cargas que se aplicaron fueron:

- Restricción del movimiento en la capa externa de la piel para simular que el paciente se encuentra en una superficie rígida.
- Fuerza aplicada en la parte superior de la Tuberosidad isquiática, equivalente al 32.5% del peso corporal, ya que, en la posición sedente, el cuerpo humano sostiene el 65% de su peso [7], por lo que, al simular un solo lado, se estableció

la mitad del porcentaje para la simulación.

Habiendo definido las propiedades de los materiales y las cargas, se procedió a correr las simulaciones obteniendo como resultado la distribución de esfuerzos y desplazamientos en la geometría estudiada. El análisis de los resultados también forma parte de la metodología Transdisciplinaria, ya que esta engloba todo el proceso desde la investigación documental hasta la investigación de impactos, sin embargo, los resultados se muestran en la siguiente sección, para más claridad.

### *D. Investigación de impactos.*

Ya habiendo obtenido los resultados de la sección experimental, se pasa a la última fase de la Metodología Transdisciplinaria: Investigación de Impactos, cuyo objetivo es evaluar el impacto que ocasiona el estudio en el mundo real y en distintos niveles holísticos, lo cual conlleva a valorar los resultados y al surgimiento de nuevas preguntas de investigación, situación que se puede convertir en trabajos futuros o en realimentación del mismo proyecto que conduzca a una nueva fase de experimentación.

Este proyecto está pensado como un paso en la mejora de la comprensión del problema de las úlceras por presión, sin embargo, el

potencial de éste no queda sólo en una mejor comprensión ya que puede ser mejorado haciendo un modelo más robusto por tanto, este modelo también brinda la posibilidad de evolucionar para convertirse en una herramienta de diseño de superficies o en un instrumento personalizado de evaluación de riesgo, lo cual se traduce en la posibilidad de manejar la prevención y el tratamiento de cada caso utilizando nuevos criterios de evaluación, significando más opciones tanto para médicos, cuidadores y, sobre todo, para el paciente. De esta manera, este trabajo tiene impacto tanto en el área de investigación y desarrollo de productos como asientos, así como en el área clínica y de atención al paciente (Véase Fig. 11).



**Figura 11.** Impacto del Modelo de Formación de úlceras (Elaboración propia, 2021).

#### IV. RESULTADOS

##### A. *Datos Obtenidos*

Se registraron los esfuerzos y desplazamientos máximos por caso y por tejido. Para realizar el análisis de resultados, se muestra gráficamente la comparativa entre los pesos (delgado, estándar y obeso) y entre esfuerzo y desplazamiento (Véase Fig. 12).

Además, en cada gráfica se agrupan los tejidos involucrados (hueso, músculo, grasa y piel) por cada nivel de daño (sano, S2, S3, S4, DTI1 y DTI2).

En el caso de los esfuerzos máximos, se registraron los siguientes valores por peso (incluyendo todos los casos de daño y tejidos): desde 0.0074 MPa hasta 3.36 MPa en el caso sano; desde 0.015 MPa hasta 10.25 MPa en el caso estándar y desde 0.035 MPa hasta 3.992 MPa en el caso obeso. En todos los pesos como en todos los tejidos se registra el esfuerzo máximo en el hueso. De igual manera, en todos los pesos destaca un caso con esfuerzos mucho mayores a los demás: en el paciente delgado como en el obeso es en el DTI2 (daño en músculo y hueso); mientras que en el caso estándar es en el grado de daño S4 (daño total). Así, se puede notar que el esfuerzo máximo se registra cuando existe daño en el músculo y la grasa, pudiendo estar o no estar involucrada la piel.

Al enfocar los desplazamientos máximos, se obtuvieron los siguientes valores por peso (incluyendo todos los casos de daño y tejidos): caso Delgado: 0.02 mm-7.85 mm, caso Estándar: 1.57-27.8 mm, caso obeso: 2.126-45.80 mm. Se puede observar que el desplazamiento máximo se da siempre en los tejidos más internos, es decir, en el hueso, el músculo y en ciertos casos, la grasa. El desplazamiento menor siempre se registra en la piel, ya que es donde se aplicó la restricción de movimiento. En los tres pesos distintos se observa que el caso en que se presenta el daño máximo es en el S4, correspondiendo al daño total, lo cual puede corresponder a la mayor falta de tejido que permite un mayor movimiento del tejido restante.



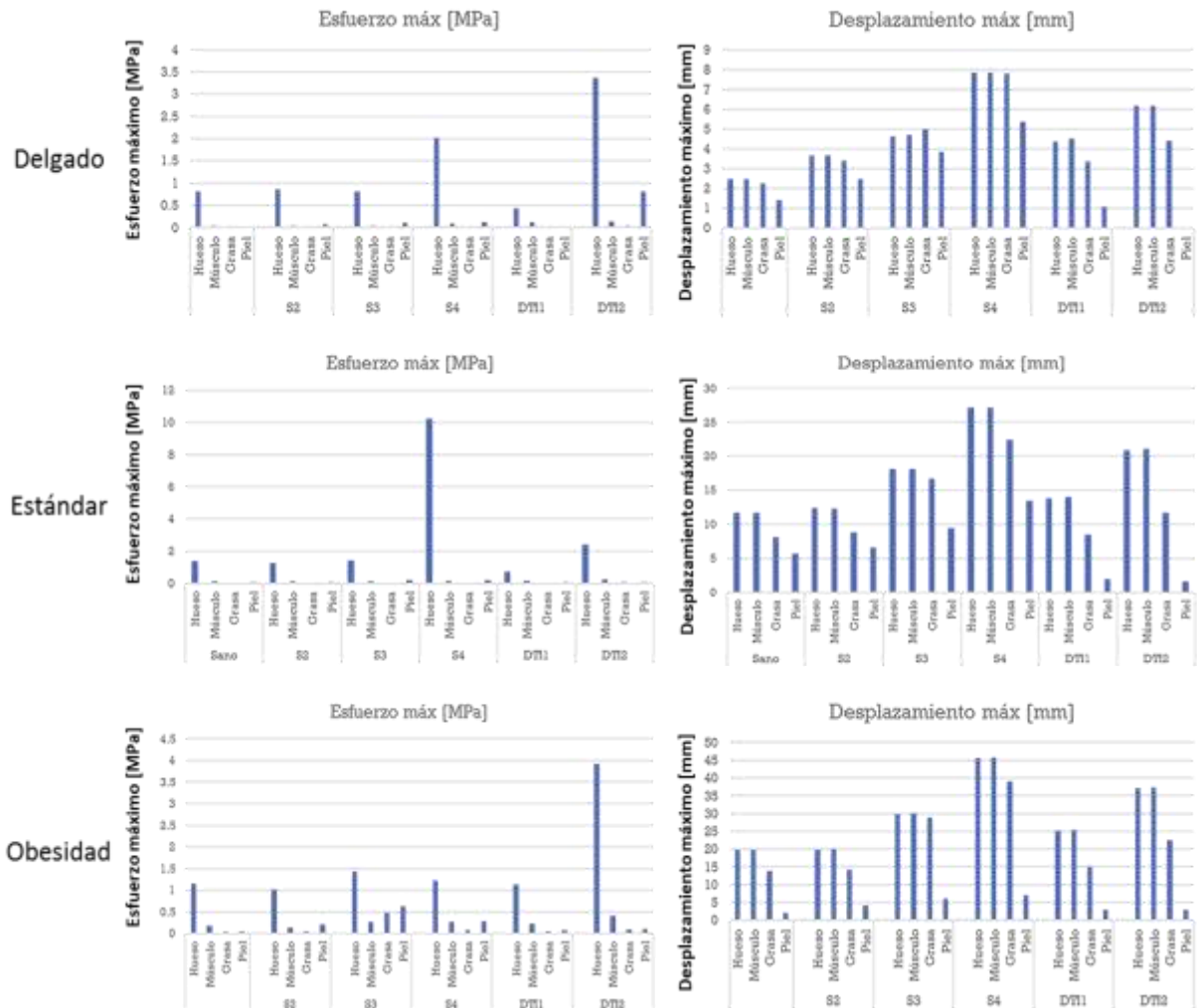


Figura 12. Gráficas de esfuerzos y desplazamientos máximos por tejido (Elaboración propia, 2021).

**B. Análisis Estadístico**

Para el análisis estadístico se tomaron como variables dependientes los valores de esfuerzo máximo y desplazamiento máximo y se diseñó un modelo de 3 factores de efecto fijo para cada una, calculado con un nivel de confianza del 95% ( $\alpha=0.05$ ).

- Factores:
  - Peso: 3 niveles (delgado, estándar y obeso)
  - Daño: 6 niveles (sano, S2, S3, S4, DTI1 DTI2)
  - Tejido: 4 niveles (hueso, músculo, grasa y piel)

Para el cual el modelo de datos es el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + C_k + e_{ij} + e_{ik} + e_{jk} + e_{ijk}$$

Donde:

$Y_{ijk}$ : Variable dependiente (Esfuerzo o desplazamiento según el caso)

$\mu$ : Media global

$A_i$  = efecto del primer factor (Peso,  $i = 1,2,3$ )

$B_j$  = efecto del segundo factor (Daño,  $j = 1,2 \dots 6$ )

$C_k$  = efecto del tercer factor (Tejido,  $k = 1,2 \dots 4$ )

$e$  = efectos de las interacciones entre factores

Es decir, que la variable dependiente estará dada por la media global más los efectos individuales de cada factor, más los efectos de las interacciones entre ellos. Por tanto, la

hipótesis al realizar el Análisis de varianza es que los efectos de los factores sean nulos, de lo contrario, se rechaza  $H_0$ .

$$H_0: A_i = B_j = C_k = 0$$

Se realizaron las siguientes pruebas:

- Análisis de Varianza Multifactorial por suma de cuadrados.
- Prueba de Medias por Mínimos Cuadrados con intervalos de confianza
- Prueba de Múltiples Rangos LSD-Fisher

### ***Resultados Variable dependiente:***

#### ***Esfuerzos Máximos:***

En el caso de los esfuerzos Máximos, no se rechazó  $H_0$  solamente para el tipo de tejido, es decir, sólo para este factor se encontró influencia estadísticamente significativa sobre los Esfuerzos máximos. La prueba de medias y de múltiples rangos arrojaron que, para el factor de peso, el mayor grupo de medias fue el caso obeso (aunque la LSD de Fisher no la identificó como un grupo no homogéneo), para el factor de daño, fue el caso S4 y para el factor de tejido fue el hueso (estos dos grupos sí obtuvieron diferencia estadísticamente significativa de los demás casos).

### ***Resultados: Variable Dependiente:***

#### ***Desplazamientos Máximos:***

En el caso de los desplazamientos, el ANOVA rechazó  $H_0$  para todos los factores y todas las interacciones, es decir, que tanto peso, daño tejido y las interacciones entre ellos presentaron influencia estadísticamente significativa en los desplazamientos. Las pruebas de medias arrojaron que, para el factor peso, el desplazamiento aumenta conforme aumenta éste, es decir el caso obeso fue el que mayores desplazamientos reportó; para el factor daño, se identificó S4 como el nivel con mayores desplazamientos y para el factor tejido, tanto hueso como músculo arrojaron los desplazamientos máximos,

considerándose estos dos, grupos homogéneos por la prueba LSD.

Analizando los resultados obtenidos de la variable Daño con los esfuerzos, se puede observar que, se diferencian algunos grupos que presentan esfuerzos ligeramente mayores: el caso estándar en cuestión del peso y la DTI2 y la S4, en el caso del daño. Lo que tienen en común DTI2 y S4 es que presentan daño tanto en músculo como en grasa y, por tanto, el hueso pierde soporte al aplicar la fuerza y, como se mencionó anteriormente, en los desplazamientos sí influye el daño, por lo que es posible que en estos casos exista el riesgo se cause más daño en el tejido y evolucione más rápido la lesión, existiendo realimentación en el sistema de formación de úlceras por presión.

También se puede observar el hecho que, tanto en esfuerzos como desplazamientos, sí hay cambios respecto al tejido, siendo siempre los tejidos más internos (hueso y músculo) aquellos que presentan mayores esfuerzos y desplazamientos mucho mayores a los que aparecen en la piel. Lo cual coincide con estudios hechos por Gefen [17] quien asegura que los tejidos internos experimentan presiones hasta 11 veces mayores que en la piel y, que no es posible predecir la aparición de úlceras internas a partir de mediciones superficiales.

## **V. DISCUSIÓN**

Para poder validar los datos obtenidos, se compararon los resultados de los esfuerzos obtenidos en tejido sano con bibliografía consultada en artículos que también desarrollan modelos de Elementos finitos[7], [15], [16]. En dichos estudios se encontraron esfuerzos en piel desde 0.02 hasta 0.269 MPa, los valores aquí encontrados variaron de 0.0122 a 0.06 MPa; los esfuerzos encontrados en tejido graso fueron desde 0.026 a 0.04 MPa en los estudios citados, mientras que los

esfuerzos en grasa en el estudio actual alcanzaron valores de 0.0079 a 0.03; la bibliografía indica esfuerzos en el músculo de 0.02 a 0.04 MPa en comparación de 0.0375 a 0.179 MPa arrojados en este modelo; y, por último, los esfuerzos máximos totales consultados variaron desde 0.04 hasta 1.672 MPa, mientras que el modelo arrojó valores máximos entre 0.819 y 1.155. La comparación se hizo con los casos sanos ya que en el resto de los artículos no se utiliza el tejido con daño en los modelos. Se puede observar que los valores aquí obtenidos se encuentran dentro o muy cercanos al rango de la bibliografía consultada.

En contraste con los estudios previamente mencionados en la introducción, que mencionan mayor riesgo en pacientes con IMC extremos, el modelo aquí estudiado arroja esfuerzos más altos en el caso estándar y no se encontró estadísticamente significativa la influencia del peso sobre los esfuerzos, los cuales representan la variable de riesgo relacionada a la presión en el tejido. Sin embargo, sí se coincide en el caso de los desplazamientos, ya que sí indica influencia estadísticamente significativa el peso sobre los desplazamientos, además que se presentan desplazamientos mayores mientras más peso tenga el individuo. Los desplazamientos indican cuánto se está deformando el tejido, por tanto, también es una variable de interés en cuanto a indicadores de riesgo.

## VI. CONCLUSIONES

En este proyecto se estudió el problema de las úlceras por presión desde un punto de vista sistémico y transdisciplinario, mediante el cual se pudieron identificar variables importantes en el desarrollo de úlceras por presión y estudiar cómo se relacionan en el proceso de formación de lesiones. También se identificaron los alcances del investigador y qué herramientas debía utilizar para el desarrollo del proyecto en conjunto con un

equipo de trabajo multidisciplinario. Durante la fase experimental se desarrolló un Modelo Biomecánico, cumpliendo así con los objetivos planteados para este proyecto.

Asimismo, se analizó la influencia del IMC, la cantidad de tejido, y el daño previo sobre el desarrollo de daño y se encontró que las tres variables presentan influencia estadísticamente significativa sobre las variables que se tomaron como indicadores de desarrollo de daño que fueron los esfuerzos y desplazamientos máximos. Esto sugiere que, efectivamente existe una relación entre las variables encontradas y el desarrollo de daño en el tejido.

En contraste con los estudios previamente mencionados en la introducción, que mencionan mayor riesgo en pacientes con IMC extremos, el modelo aquí estudiado arroja esfuerzos más altos en el caso estándar y no se encontró estadísticamente significativa la influencia del peso sobre los esfuerzos, los cuales representan la variable de riesgo relacionada a la presión en el tejido. Sin embargo, sí se coincide en el caso de los desplazamientos, ya que sí indica influencia estadísticamente significativa el peso sobre los desplazamientos, además que se presentan desplazamientos mayores mientras más peso el individuo. Los desplazamientos indican cuánto se está deformando el tejido, por tanto, también es una variable de interés en cuanto a indicadores de riesgo.

Se pudo observar que este modelo aporta información nueva al combinar tres factores distintos de riesgo. Al realizar el modelo biomecánico y resolverlo por el método del Elemento Finito se observa que las variables de peso, daño y tejido sí presentan influencia estadísticamente significativa ya sea en esfuerzos o en desplazamientos, es decir, los tres influyen en la probabilidad de desarrollo de daño del tejido. En cuanto al peso, se encontró que los casos de obesidad y peso

estándar presentan el mayor riesgo. En cuanto al tejido, se identificó el músculo como el tejido blando con más riesgo, aunque el hueso presentó esfuerzos mayores debido a que es el elemento con mayor rigidez del sistema.

Asimismo, se pudo identificar que tanto esfuerzos como desplazamientos son mucho mayores siempre en el tejido interno, por tanto, no es suficiente con evaluar las presiones superficiales como método de prevención, sin embargo, se pueden utilizar modelos de este tipo para evaluar superficies, materiales y diseños de soporte, además de enriquecer el diseño con la evaluación de otros factores.

Al analizar a la variable de Daño, se encontró realimentación en el sistema de formación de úlceras por presión, ya que el modelo muestra que los casos más propensos son aquellos en que están lastimados el músculo y la grasa al mismo tiempo, lo cual ocasiona que el hueso pierda soporte al aplicar la fuerza, generando una deformación mayor en el tejido y, por tanto, exista el riesgo de que se desarrolle más daño y evolucione más rápido la lesión.

Esta información abre oportunidad a tener una mejor comprensión del tema, sin embargo, el modelo no sólo permite esto, sino también puede ser utilizado a futuro como herramienta para diseño y evaluación de asientos reductores de presión. Otra oportunidad que brinda este modelo es la de realizar evaluaciones de riesgo personalizadas, para generar un tratamiento especializado según el grado de daño. La evaluación de impactos de este proyecto permite vislumbrar que dicho modelo puede contribuir tanto en la investigación, como el desarrollo de superficies y también en la práctica clínica dando la posibilidad de generar más opciones para los usuarios y contribuir en la prevención y el tratamiento.

## REFERENCIAS

- [1] NPUAP, “NPUAP Pressure Ulcer Stages/Categories”, *National Pressure Ulcer Advisory Panel.*, 2016. [Online]. Available: <http://www.npuap.org/>. [Accessed: 17-Jun-2018].
- [2] Johns Creek (GA): Ebix, Inc., A.D.A.M.. “Áreas donde se presentan las úlceras de presión”. Enciclopedia Médica A.D.A.M. [Internet]. [https://medlineplus.gov/spanish/ency/esp\\_imagepages/19091.htm](https://medlineplus.gov/spanish/ency/esp_imagepages/19091.htm) (accessed jul. 24,2022).
- [3] Torra-bou, J. E., Verdú-soriano, J., Sarabia-lavin, R., Paras-bravo, P., Soldevilla-ágreda, J. J., & López-, P. (2017). Una contribución al conocimiento del contexto histórico de las úlceras por presión. *Gerokomos*, 28(3), 151–157
- [4] Hospital General Universitari Catalunya. "Cuidados de la piel. Úlcera por presión (UPP)". Hospital General Universitari Catalunya[Internet] <https://www.hgc.es/es/pacientes-visitantes/consejos-salud/cuidados-piel/ulcera-presion-upp> (Accessed jul. 26, 2022)
- [5] S. A. Kayser, C. A. VanGilder, and C. Lachenbruch, “Predictors of superficial and severe hospital-acquired pressure injuries: A cross-sectional study using the International Pressure Ulcer Prevalence™ survey”, *Int. J. Nurs. Stud.*, vol. 89, pp. 46–52, Jan. 2019.
- [6] A. Lechner, N. Lahmann, et al. "Dry skin and pressure ulcer risk: A multi-center cross-sectional prevalence study in German hospitals and nursing homes". *International Journal of Nursing Studies*, Volume 73, 2017.



- [7] E. Linder-ganz and A. Gefen, "Damage Laws to Determine Biomechanical Risk Factors for", vol. 131, no. January 2009, pp. 1–13, 2016.
- [8] J. Kottner, et al. "Measuring the quality of pressure ulcer prevention: a systematic mapping review of quality indicators". *International wound journal*, 2018, vol. 15, no 2, p. 218-224.
- [9] C. Hernandez-Aguilar, "Transdisciplinary Methodological Option for Initial Research Process: Training of Researchers", *Transdiscipl. J. Eng. Sci.*, vol. 9, pp. 157–181, 2018.
- [10] *Ley General de Salud*. Última Reforma DOF 16-05-2022 Estados Unidos Mexicanos, p 58 (Accessed jul. 25, 2022).
- [11] J. A. Acevedo-Díaz, , et al. "Modelos científicos: significado y papel en la práctica científica". *Revista científica* 30, 2017 p.p. 155-166..
- [12] K. Al Mutairi and D. Hendrie, "Global Incidence and Prevalence of Pressure Injuries in Public Hospitals: A Systematic Review", *Wound Med.*, 2018.
- [13] D. Rodríguez-Cruz , et al. "Proceso enfermero aplicado a un paciente con úlceras por presión". *Vive Revista de Salud* 3.9 .2020, pp. 253-264.
- [14] Araujo-Monsalvo, Victor M., et al. "Analysis of mechanical behavior of the underlying tissue to the ischial tuberosities using finite element method". *International Journal of Morphology* 34.3 (2016): 1142-1147.
- [15] A. Gefen, B. van Nierop, D. L. Bader, and C. W. Oomens, "Strain-time cell-death threshold for skeletal muscle in a tissue-engineered model system for deep tissue injury", *J. Biomech.*, vol. 41, no. 9, pp. 2003–2012, 2008.
- [16] M. Bucki *et al.*, "Patient-specific finite element model of the buttock for pressure ulcer prevention linear vs non linear modelling", *Comput. Methods Biomech. Biomed. Engin.*, vol. 15, pp. 38–40, 2012.
- [17] a Gefen and J. Levine, "The false premise in measuring body-support interface pressures for preventing serious pressure ulcers", *J. Med. Eng. Technol.*, vol. 31, no. 5, pp. 375–380, 2007.