

# Efecto de la geometría de electrodo en la distribución de potencial en la superficie de un material fantasma de la piel

Humberto F. Delgado Arenas y René Antaño López\*

[\\*rantano@cideteq.mx](mailto:*rantano@cideteq.mx)

Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica  
Querétaro, Qro., México

## Resumen

La técnica de impedancia es una opción atractiva para el desarrollo de métodos no invasivos en la determinación de glucosa sanguínea. Uno de sus principales problemas es la presencia de un valor inaceptable de ruido y desviaciones en las mediciones. Por esta razón se decidió analizar el efecto de la geometría de electrodo en las mediciones de resistencia superficial. En primer lugar, se analizó la distribución de potencial mediante simulación computacional usando el método de elemento finito. Posteriormente, se probaron las diferentes geometrías en un material fantasma de la piel en un sistema multicapa. Por último, se encontraron aspectos clave comparando las configuraciones de electrodos, concluyendo que los niveles de error disminuyen en forma considerable para la configuración de 4 electrodos.

**Palabras clave:** Fantasma de la piel; geometría de electrodo; resistencia eléctrica de la piel; potencial eléctrico; Espectroscopía de Impedancia de multicapas.

## Abstract

*The impedance technique is an attractive option for the development of non-invasive methods in the determination of blood glucose. One of the main problems is unacceptable noise and deviations in the measurements. Because of this it was decided to analyze the effect of the electrode geometry in the surface resistance measurements. Firstly, the distribution of potential was analyzed by computational simulation by using the finite element method. Subsequently, the different geometries were tested in a phantom skin material on a multilayer system. Finally, key aspects were found by comparing the electrode configurations, evidencing that error levels were considerably reduced for the 4 electrodes setup.*

**Key words:** Skin phantom; electrode geometry; skin's electrical resistance; electric potential; Impedance Spectroscopy on multilayer.

---

### Artículo arbitrado

---

Recibido:  
22 de abril de 2019

Aceptado:  
09 de julio de 2019

## Introducción

Los cambios alimenticios en la sociedad han llevado a un incremento sostenido de los casos de diabetes y por lo tanto la necesidad de desarrollar métodos menos invasivos de medición del nivel de glucosa en sangre. Actualmente, solo se cuenta comercialmente con la opción de métodos invasivos y discontinuos para este tipo de determinación, lo que aumenta las complicaciones a largo plazo de esta enfermedad, en especial lesiones cutáneas. De ahí que constantemente se están desarrollando métodos mínimamente o no invasivos para la determinación de glucosa sanguínea.

Las propiedades mecánicas de la piel, el principal órgano para el monitoreo de glucosa, dependen de la geometría en las redes de colágeno y elastina en la dermis, se sabe que los cambios relacionados con la edad están en función de la degradación en las redes de elastina en la dermis haciéndose notable una pérdida progresiva de la elasticidad (Daly & Odland, 1979). En cuanto al grosor de la piel, incrementa en los primeros años de vida, hasta la maduración y permanece constante siendo en la edad avanzada cuando comienza un decaimiento de éste, sumado a un incremento en la rigidez (Esoffier et al., 1989) (Shuster et al., 1975), otro dato importante es que el grosor de la epidermis varía dramáticamente de acuerdo al sitio corporal (Whitton & Everrall, 1973). Ahora, en relación con la insulina, se ha inferido que juega un papel importante en la homeostasis de la epidermis, se ha observado que la hiperglicemia presente en pacientes con diabetes promueve la deshidratación del estrato corneo (Sakai, Kikuchi, Satoh, Tagami, & Inoue, 2005). También disminuyen los niveles de aminoácidos y ceramidas, los principales componentes de los lípidos intracelulares en el estrato corneo, teniendo características similares en personas con dermatitis atópica o edad avanzada (Sakai et al., 2005).

La impedancia es la medición de la oposición de un material al paso de la corriente alterna (Orazem & Tribollet, 2008). Mediante la medición de

impedancia en un rango de frecuencias se pueden determinar las propiedades eléctricas del material (Bronzino & Patterson, 2000). En relación con las propiedades eléctricas de la piel, se ha identificado al estrato córneo como el elemento de mayor contribución a la impedancia total en la piel (Yamamoto & Yamamoto, 1976). Mediante la remoción de esta capa superficial se ha observado el cambio de la impedancia en varios órdenes de magnitud. Esta estructura queratinizada es por lo tanto la principal contribución a la impedancia cutánea total, cabe señalar que sus propiedades eléctricas son similares a las de otras estructuras queratinizadas, como las uñas (Martinsen, Grimnes, & Sveen, 1997).

Aunque las investigaciones previas han realizado aportes importantes, lo cierto es que la correlación entre el cambio en las propiedades eléctricas cutáneas debidas a los cambios fisiológicos en personas diabéticas a corto y largo plazo queda aún sin esclarecer del todo. Como resultado hasta la fecha no se cuenta con un método no invasivo confiable basado en la medición de impedancia para la identificación de factores de riesgo en personas diabéticas, y se deben seguir estudiando los factores que mejoren la medición. Lo que se muestra en este trabajo es la gran influencia de la geometría del electrodo en las mediciones de impedancia sobre un material fantasma de la piel y cuál geometría es la más adecuada para las mediciones.

Los materiales fantasma son objetos que mimetizan o imitan propiedades de tejidos humanos, como la piel (Pinto, Bertemes-Filho, & Paterno, 2015). Los materiales fantasma son usados para evaluar, analizar y optimizar la aplicación de dispositivos médicos y métodos de medición (Pinto, Bertemes-Filho, & Paterno, 2015). El material fantasma debe responder de una manera similar a los tejidos humanos para determinada aplicación o dispositivo de medición (Pinto, Bertemes-Filho, & Paterno, 2015).

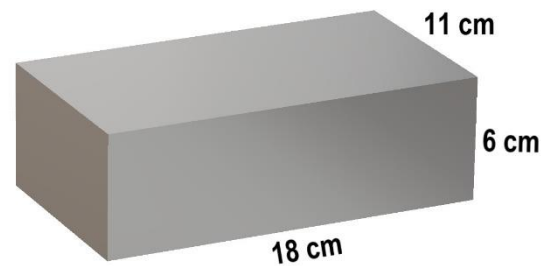
## Método

Se elaboró y determinaron las propiedades eléctricas de un material que emula a la piel (fantasma de la piel), desarrollando aspectos teóricos en la medición y se evidenciaron las contribuciones al espectro de impedancia de las capas que componen al material, tomando como base la resistencia a altas frecuencias. Se compararon además las mediciones con las configuraciones de dos, tres y cuatro electrodos.

Las simulaciones fueron hechas mediante modelos en tres dimensiones de corriente primaria, para evidenciar la distribución de potencial en la superficie y el seno de la muestra. Fueron considerados dos tipos de electrodos con diferente geometría (rectangular y circular). El tejido fue simulado como un prisma de 18cm\*11cm\*6cm, que corresponden al largo, ancho y profundidad respectivamente. El potencial del electrodo de trabajo fue 0 mV y el potencial del contraelectrodo 50 mV. El modelo en tres dimensiones fue segmentado en una red de elementos por un paquete de software de elemento finito COMSOL Multiphysics 4.4 a) (Dickinson, Ekström, & Fontes, 2014).

Se usó un gel proteico como material análogo a la piel (Pinto et al., 2015), y aluminio para elaborar electrodos de la geometría deseada (Ivanic, Novotny, Rehacek, Tvarozek, & Weis, 2003), tal como se menciona a continuación.

El bloque de gel proteico usado en las mediciones era rectangular y con dimensiones de 18x11x6cm (*cf.* Figura 1). En el gel proteico se controló la concentración de sales presentes para elaborar dos tipos de sistemas: Uno sin la presencia de cloruro de potasio, al que llamaremos gel resistivo (GR), y uno con la presencia de cloruro de potasio al que llamaremos gel conductor (GC). En la siguiente Tabla 1 se condensan sus componentes correspondientes:

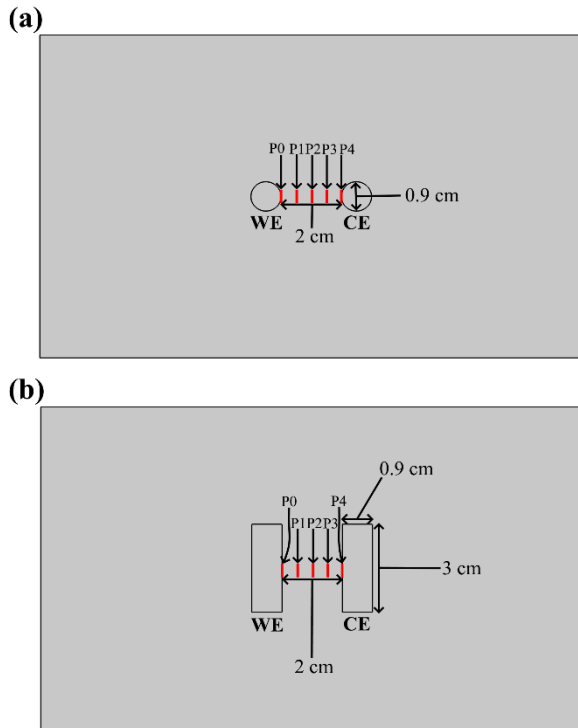


**Figura 1.** Diagrama donde se ilustra el prisma elaborado de material fantasma de la piel, para corroborar con mediciones de impedancia las simulaciones llevadas a cabo. Fuente: elaboración propia.

Gel proteico	Grenetina (g)	KCl (M)	Agua (L)
GR	38	0	1
GC	38	0.33	1

**Tabla 1.** Componentes en los gels proteicos usados. Fuente: elaboración propia.

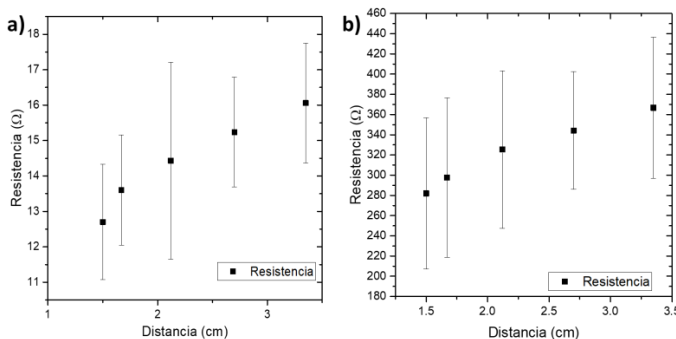
Los experimentos de impedancia se llevaron a cabo en una estación electroquímica VSP s/n 1002 (Bio-Logic SAS, France) con su interfaz de software EC-lab. La amplitud utilizada fue de 50 mV (rms) en un potencial directo de circuito abierto en el intervalo de frecuencias de 10 kHz a 10 Hz. La caída de potencial de determino; entre el electrodo de trabajo y el contraelectro para dos electrodos, ente el electrodo de trabajo y el de referencia para tres electrodos, finalmente entre dos electrodos de referencia para cuatro electrodos. Se usaron electrodos de aluminio como electrodo de trabajo (WE) y contraelectrodo (CE) para los electrodos circulares (radio de 0.45 cm) y los electrodos rectangulares (de largo 3 cm y ancho 0.9 cm). Para las mediciones de tres y cuatro electrodos se elaboraron electrodos de Ag|AgCl como referencia (de largo 0.5 cm y ancho 0.1 cm). En las tres configuraciones de electrodo se tomo una distancia entre los electrodos de referencia entre los diferentes puntos P0 a P5, como se muestra en la Figura 2, donde representan la separación entre electrodo en la medición (0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 cm respectivamente).



**Figura 2.** Diseño experimental en las mediciones de impedancia sobre la superficie del material fantasma, en rojo los puntos (P0 a P4) que marcan la distancia entre los electrodos de referencia. En este caso de P0 a P4 correspondiente a una separación de 2 cm. En (a) electrodos circulares y en (b) electrodos rectangulares. Fuente: elaboración propia.

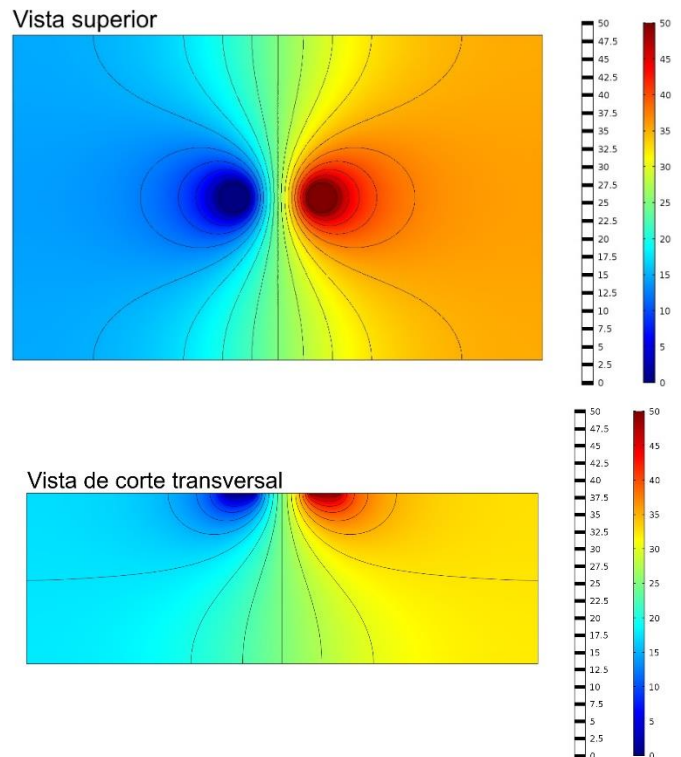
### Resultados y discusión

Primero, se muestran los resultados tomados con electrodos circulares en una medición contra la distancia entre los electrodos de referencia. En la Figura 3 se muestran los resultados obtenidos para la configuración de tres electrodos circulares.



**Figura 3.** Valores de resistencia superficial en a) la muestra GC y b) la muestra GR, con la variación de la distancia entre los electrodos de referencia. En una configuración de tres electrodos.

Debido a la dispersión en los datos y el tipo de curva en el promedio de las mediciones, se sospecha de una dependencia radial, comportamiento acorde con la geometría de los electrodos. Para ilustrar este fenómeno se realizaron simulaciones de una distribución de potencial en una superficie con dos electrodos circulares y una diferencia de potencia de 50 mV entre estos como se ilustra en la Figura 4.

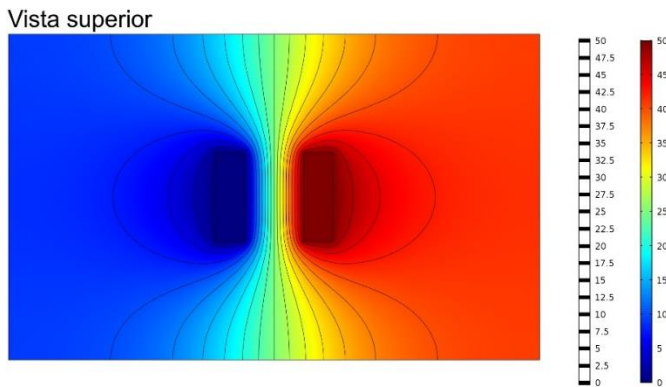


**Figura 4.** Vista superior y transversal de la simulación del potencial eléctrico en la superficie del gel proteico con electrodos circulares, con una un voltaje de 50 mV entre el electrodo de trabajo y el contraelectrodo. Fuente: elaboración propia.

Es evidente, que la distribución de potencial en la superficie de la muestra presenta una distribución radial del potencial aplicado y requiere un alto grado de precisión y exactitud en la colocación de los electrodos de referencia, debido a que, un pequeño cambio en la distancia entre los electrodos de referencia acarrea un cambio significativo en la medición. Se infiere que, en las configuraciones de

dos, tres y cuatro electrodos siempre se presentará una distribución radial del potencial. Tomado en cuenta lo mencionado, se optó por un cambio en la forma geométrica con el fin de obtener una relación lineal con la distancia entre los electrodos de referencia, en las mediciones con tres y cuatro electrodos.

Debido a esto, se optó por simular electrodos rectangulares, con la finalidad de crear una zona entre los electrodos, trabajo y contraelectrodo, con variación lineal en la distribución del potencial aplicado. El resultado de la simulación se muestra en la Figura 5.

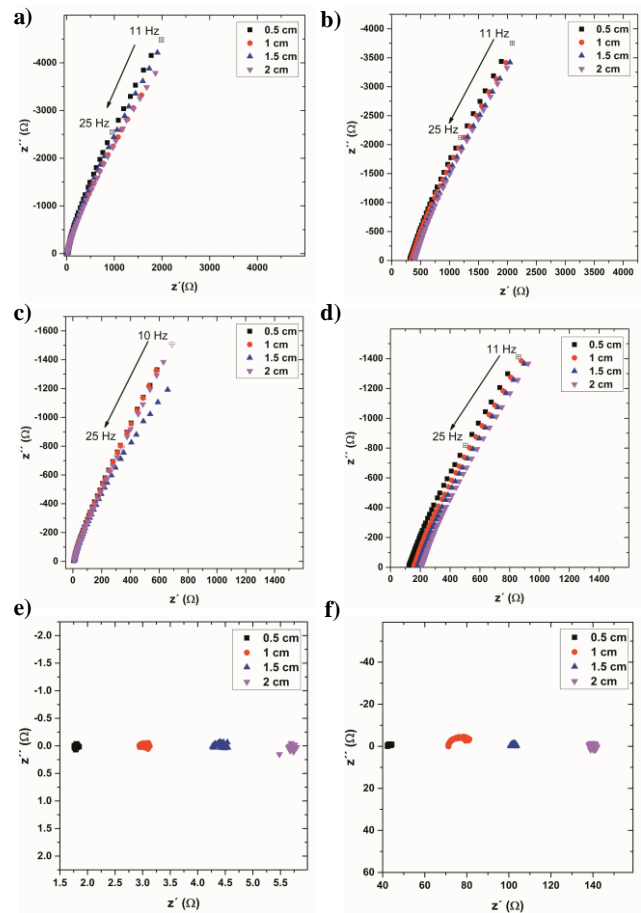


**Figura 5.** Vista superior de la simulación del potencial eléctrico en la superficie del gel proteico con electrodos rectangulares, con una un voltaje de 50 mV entre el electrodo de trabajo y el contraelectrodo. A la derecha se muestra una barra de color para el potencial correspondiente y con líneas negras se delimitan ciertos valores de potencial. Fuente: elaboración propia.

En esta representación, se observa que entre los electrodos de trabajo y contraelectrodo se encuentra un área útil con el comportamiento esperado, para llevar la desviación en los datos a niveles aceptables, así como para lograr correlacionar las mediciones de dos, tres y cuatro electrodos. Esto se cumpliría si se respetan las siguientes condiciones: una geometría rectangular en los electrodos trabajo y contraelectrodo, la distancia de separación entre electrodos debe ser menor que la distancia longitudinal de los mismos, y deben estar frente a frente, de manera paralela (*cf.* Figura 5).

Se realizó la medición de los espectros de impedancia con electrodos rectangulares cumpliendo las condiciones anteriores, sobre el gel proteico, con o sin KCl (muestra GC y GR, respectivamente). Debido a que la geometría de electrodos no generó diferencias en cuanto a las contribuciones eléctricas presentes en los espectros, solo se presentan los espectros de mayor interés (*cf.* Figura 6), correspondientes a los electrodos rectangulares en las muestras GR y GC.

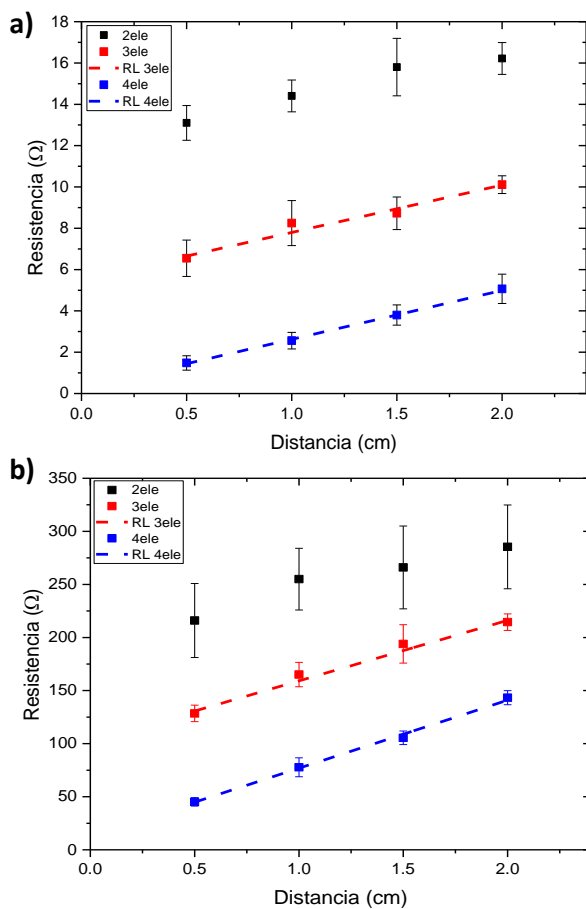
Como se ve en la Figura 6, con dos y tres electrodos se presenta el comportamiento de un capacitor en serie con una resistencia, y en el caso de la configuración de cuatro electrodos se percibe sólo una resistencia.



**Figura 6.** Espectros de impedancia a), c) y e) en la muestra GC, así como b), d) y f) en la muestra GR para las configuraciones de dos, tres y cuatro electrodos respectivamente. Con la geometría de electrodos rectangulares. Fuente: elaboración propia.

Cabe mencionar, que tanto con los electrodos circulares como con los electrodos rectangulares se obtuvo el mismo comportamiento: Una resistencia en serie con un capacitor para la configuración de dos y tres electrodos, y sólo una resistencia en la configuración de cuatro electrodos. Las resistencias se graficaron en función de la variación de la distancia entre los electrodos de referencia, y los gráficos resultantes se muestran a continuación en la Figura 7.

función de la distancia entre los electrodos de referencia. En la configuración de dos electrodos, se presenta un mayor valor de la desviación estándar en comparación con las otras mediciones. Debido, a la presencia del comportamiento radial y la alta desviación estándar, en la configuración de dos electrodos no se aplicó la regresión lineal. En la Tabla 2 se mencionan los valores de pendiente y ordenada al origen encontradas en las configuraciones de tres y cuatro electrodos.



**Figura 7.** Valores de la resistencia estimada por impedancia en función de la variación de la distancia entre electrodos de referencia en la modalidad de dos, tres y cuatro electrodos. Las siglas RL indican regresión lineal. El gráfico a) corresponde al sistema GC y el gráfico b) al GR. Fuente: elaboración propia.

Aquí, se observa el comportamiento esperado donde, para las configuraciones de tres y cuatro electrodos se ve un comportamiento lineal de la resistencia en

Muestra	Tipo de medición	m (Ω cm)	b (Ω)
GC	3 electrodos	2.2 ± 0.5	5.6 ± 0.6
	4 electrodos	2.4 ± 0.1	0.2 ± 0.2
GR	3 electrodos	57.3 ± 4.8	103.8 ± 5.2
	4 electrodos	64.4 ± 2.0	12.4 ± 2.4

**Tabla 2.** Valores de las regresiones lineales mostradas en la Figura 5 para las configuraciones de tres y cuatro electrodos, donde m es la pendiente en la recta y b la ordenada al origen, para las muestras GC y GR. Fuente: elaboración propia.

Estos resultados confirman la suposición que la geometría de los electrodos influye en el valor de los parámetros estimados por impedancia, además permite discernir entre la superficie y el seno en la muestra mediante la siguiente relación:

$$R_T = R_M + R_E + R_S$$

Donde  $R_T$  corresponde a la resistencia total registrada en la configuración de dos electrodos, que presenta una distribución radial debido a la contribución del seno de la muestra ( $R_M$ ),  $R_E$  es la resistencia del electrodo, que equivaldría a la ordenada al origen en la configuración de tres electrodos y finalmente  $R_S$  es la resistencia superficial que presenta un comportamiento lineal con respecto a la distancia entre los electrodos de referencia, en las configuraciones de tres y cuatro electrodos.

Cimentado en estas observaciones, se procedió a realizar el mismo procedimiento en muestras bicapa de los geles anteriormente utilizados, como se muestra a continuación.

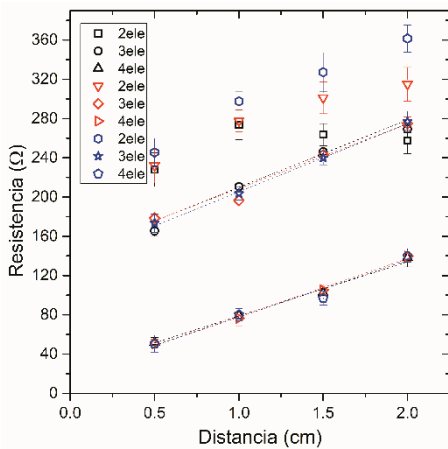


La piel es un órgano laminar multicapa, pero básicamente desde el punto de vista resistivo solo se compone de dos capas (Rothman, 1964). La capa exterior con un elevado valor de resistencia, llamada estrato corneo y las capas subsecuentes hacia el interior del tejido con una baja resistencia, debido a que se encuentran embebidas en el líquido intersticial.

Ahora, para emular la característica bicapa en la piel se elaboraron tres muestras que tiene como característica en la parte externa GR (emulando al estrato corneo) y en la parte interna GC (emulando las capas internas de la piel), con los siguientes porcentajes en altura correspondiente:

- Muestra I: 25 % GR y 75 % GC.
- Muestra II: 50 % GR y 50 % GC.
- Muestra III: 75 % GR y 25 % GC.

Los espectros de impedancia para las muestras I, II y III mostraron el mismo comportamiento ya visto en las muestras individuales (cf. Figura 7), lo interesante está en la variación de las resistencias determinadas siguiendo el mismo método analítico que con las muestras individuales, las cuales se muestran en la Figura 8.



**Figura 8.** Variación de la resistencia con la distancia entre electrodos de referencia en las muestras I (negro), II (rojo) y III (azul) para las configuraciones de dos (cuadrado), tres (circulo) y cuatro (triangulo) electrodos. Fuente: elaboración propia.

El principal punto para destacar es la desviación en la respuesta para la configuración a dos electrodos,

ya que se evidencia la disminución del valor de resistencia progresivo al aumentar la distancia entre electrodos de referencia en el siguiente orden muestra III > muestra II > muestra I. Esto, atribuido al grosor de la capa de GR ya que como se vio en la Figura 4 hay una distribución radial del potencial aplicado en el seno de la muestra, por tanto, al incrementar la distancia entre electrodos será mayor la contribución del GC. Lo que explica, un primer aumento en el valor de resistencia similar en las tres muestras, pero conforme aumenta la distancia se desfazan en relación directa al grosor del GR.

Para el caso de las mediciones a tres y cuatro electrodos, se presentan valores similares encontrados en el GR como se muestran en las Tablas 2 y 3. Comportamiento esperado, ya que la superficie en las tres muestras cuenta con las mismas características de resistencia.

Muestra	Tipo de medición	m (Ω cm)	b (Ω)
Muestra I	3 electrodos	68.6 ± 8.4	141.2 ± 8.1
	4 electrodos	55 ± 3.2	23.9 ± 3.6
Muestra II	3 electrodos	65.8 ± 5.9	142.9 ± 8.1
	4 electrodos	58.7 ± 2.5	19.6 ± 3.5
Muestra III	3 electrodos	69.3 ± 2.6	136.1 ± 3.4
	4 electrodos	57.8 ± 7.3	19.8 ± 10.5

**Tabla 3.** Valores de las regresiones lineales mostradas en la Figura 8 para las configuraciones de tres y cuatro electrodos para las muestras I, II y III, donde m es la pendiente en la recta y b la ordenada al origen. Fuente: elaboración propia.

Estas propiedades en las mediciones permiten diseñar una estrategia para determinar valores de interés en la muestra, sobre todo diferenciar las propiedades en la superficie de la muestra del seno de ésta, ya que se puede controlar, mediante la distancia entre electrodos, la profundidad en la muestra a la que es sensible la medición de dos electrodos. En el caso de las mediciones a tres y cuatro electrodos, éstas permiten identificar la resistencia en la superficie de la muestra y la resistencia debida al electrodo. Estos atributos en la medición nos permitirán diseñar electrodos efectivos en la determinación de las propiedades eléctricas de la piel.

## Conclusiones

Comparando la medición con las configuraciones de dos y tres electrodos se hace evidente la diferencia en la magnitud de los espectros, atribuido al efecto de la impedancia de la interfaz electrodo-muestra. En cambio, en la medición con la configuración de cuatro electrodos está ausente la impedancia de la interfaz electrodo-muestra, con lo que el contraste entre los tipos de configuración aporta información vital para la determinación de las propiedades eléctricas en la muestra.

La geometría en los electrodos es crucial para la distribución de potencial en la muestra y por ende afecta en la medición de los parámetros de impedancia. La geometría de electrodos propuesta disminuirá a niveles aceptables el error en la medición, de los parámetros de impedancia en piel, y así mismo permitirá discriminar la impedancia en la capa externa de la piel de la interna junto con tejidos circundantes.

Estos hallazgos nos permiten ver en el fondo, que es posible con el contraste de la configuración de electrodos y el uso de los materiales fantasma de tejidos biológicos determinar las variables analíticas determinantes en la medición de impedancia. Filosofía que se usará en un futuro para identificar y correlacionar como variable independiente a una propiedad física con una variable dependiente a la impedancia o un elemento del circuito equivalente característico.

## Agradecimientos

Los autores agradecen y reconocen al Dr. German Orozco por permitirnos utilizar su licencia académica de COMSOL 4.4 a).

## Referencias

- Bronzino, E. J. D., & Patterson, R. (2000). 73 Bioelectric Impedance Measurements. In *The Biomedical Engineering Handbook: Second Edition*.
- Daly, C. H., & Odland, G. F. (1979). Age-related Changes in the Mechanical Properties of Human Skin. *Journal of Investigative Dermatology*, 73(1), 84–87. doi:10.1111/1523-1747.ep12532770
- Dickinson, E. J. F., Ekström, H., & Fontes, E. (2014). COMSOL Multiphysics®: Finite element software for electrochemical analysis. A mini-review. *Electrochemistry Communications*, 40, 71–74. doi:10.1016/j.elecom.2013.12.020
- Escoffier, C., De Rigal, J., Rochefort, A., Vasselet, R., Lcvcque, J.-L., & Agache, P. G. (1989). Age-Related Mechanical Properties of Human Skin: An In Vivo Study. *J Invest Dermatol*, 93, 353–357. doi:10.1016/0022-202X(89)90058-4
- Ivanic, R., Novotny, I., Rehacek, V., Tvarozek, V., & Weis, M. (2003). Thin film non-symmetric microelectrode array for impedance monitoring of human skin. *Thin Solid Films*, 433(1-2 SPEC.), 332–336. doi:10.1016/S0040-6090(03)00389-4
- Martinsen, Ø. G., Grimnes, S., & Sveen, O. (1997). Dielectric properties of some keratinised tissues. Part 1: Stratum corneum and nail in situ. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 35(3), 172–176. doi:10.1007/BF02530033
- Orazem, M. E., & Tribollet, B. (2008). *Electrochemical Impedance Spectroscopy*. *Electrochemical Impedance Spectroscopy*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. doi:10.1002/9780470381588
- Pinto, A. M. R., Bertemes-Filho, P., & Paterno, A. (2015). Gelatin: a skin phantom for bioimpedance spectroscopy. *Biomedical Physics & Engineering Express*, 1(3), 035001. doi:10.1088/2057-1976/1/3/035001
- Rothman, S. (1964). *The Epidermis*. (W. Montagna & W. C. Lobitz, Eds.), *The Epidermis*. Elsevier. doi:10.1016/C2013-0-12540-8
- Sakai, S., Kikuchi, K., Satoh, J., Tagami, H., & Inoue, S. (2005). Functional properties of the stratum corneum in patients with diabetes mellitus: Similarities to senile xerosis. *British Journal of Dermatology*, 153(2), 319–323. doi:10.1111/j.1365-2133.2005.06756.x
- Shuster, S., Shuster, S., Black, M. M., Black, M. M., McVITIE, E., & McVITIE, E. (1975). The influence of age and sex on skin thickness, skin collagen and density. *British Journal of Dermatology*, 93(6), 639–643. doi:10.1111/j.1365-2133.1975.tb05113.x
- Whitton, J. T., & Eversall, J. D. (1973). The thickness of the epidermis. *British Journal of Dermatology*, 89(5), 467–476. doi:10.1111/j.1365-2133.1973.tb03007.x
- Yamamoto, T., & Yamamoto, Y. (1976). Electrical properties of the epidermal stratum corneum. *Medical & Biological Engineering*, 14(2), 151–158. doi:10.1007/BF02478741