

**MEDICIÓN DEL CONTENIDO DE ALMIDÓN Y PORCENTAJE DE MATERIA
SECA EN RAÍCES DE YUCA FRESCA BASADA EN ESPECTROSCOPIA DE
IMPEDANCIA ELÉCTRICA**

ALBERTO ELÍAS ÁLVAREZ ÁLVAREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
Bucaramanga
2008

MEDICIÓN DEL CONTENIDO DE ALMIDÓN Y PORCENTAJE DE MATERIA SECA EN RAÍCES DE YUCA FRESCA BASADA EN ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA

ALBERTO ELÍAS ÁLVAREZ ÁLVAREZ

Trabajo de grado para optar al título de
INGENIERO ELECTRÓNICO

Director
Físico & Ing. David Alejandro Miranda Mercado, MsC.

Codirector
PhD. Enrique Mejía Ospino

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECANICAS
ESCUELAS DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
Bucaramanga
2008

DEDICATORIA

Desde que nací he tenido maestros que me han evaluado y exigido al máximo; a veces me he sentido presionado, a veces afligido y muchas veces solo. Hoy veo con los resultados, y entendiendo que todo aquello que se sufre para lograr un sueño es lo que se llama experiencia, y que esa experiencia ha tenido un impulso, mi padre Alberto Elías Álvarez Álvarez, y mi madre Miriam Solfany Alvarez Arroyo, porque cuando me enseñaron a caminar me dijeron que debía aprender a correr, que cuando me enseñaron a hablar me dijeron que me tocaba aprender a escribir y leer... hoy que he aprendido tantas cosas sigo consciente de que debo aprender más y, es esa la enseñanza que les debo, de ser insaciable de sabiduría.

Luego cuando mi mundo se volvía sin sabor y métrico, Dios mando la forma y el arte en una persona que me enseñó la simpleza de la ingeniería, a tener un buen humor que evitara tomarme tanto en serio, que los errores son reales y que la perfección no es necesaria para ser feliz, que la felicidad es tan simple que no se necesita de complejos cálculos matemáticos, gracias María Mónica por hacer que mi Corazón salte de alegría y que no calcule mis emociones.

Como maestros tuve a dos grandes personas, que con su humildad y tenacidad siempre estuvieron ahí, a los profesores David Miranda y Enrique Mejía les debo la realidad de éste trabajo, le doy gracias a Dios por habérmelos encontrado en mi camino.

A todos mis compañeros, amigos y profesores de Sampués y de la Universidad Industrial de Santander, gracias por su incondicionalidad, gracias por estar en mis momentos difíciles, prometo que de ahora en adelante habrá más tiempo para todo aquello que les falte.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación no hubiese sido posible sin la excelente dirección del Ing. David Alejandro Miranda Mercado y el Dr. Enrique Mejía Ospino. A quien quiero agradecer con entereza y fraternidad.

Igualmente gracias a,

A la Corporación de la Investigación de la Corrosión (CIC) por poner a mi disposición el Analizador de Espectros BAS ZAHNER IM6 y la muy gentil colaboración de su equipo de trabajo, en especial al Ing. Daniel Martínez y al Físico Ferney Vezga.

A la Dra. Luz Helena Villamizar que en nombre del Centro de Investigaciones para el desarrollo agropecuario (CIAGRO) patrocinó los análisis espectrofotométricos de los almidones solubles y las raíces de yuca.

A la facultad de Biología de la Universidad de Sucre y al Centro de Investigación de agricultura Tropical (CIAT) por la suministración de información vital para el desarrollo de éste trabajo.

Al Ing. Samuel Jaimes Morales, por su paciencia e incondicionalidad.

A la Dra. Aidé Perea por suministrar el escaso almidón soluble CarloErba.

Al laboratorio de Pruebas Industriales de la Universidad Industrial de Santander por las pruebas de conductividad, vitales para la calibración de las medidas.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. FUNDAMENTO TEORICO	4
1.1. YUCA: GENERALIDADES Y APLICACIONES	4
1.1.1 Bioplásticos a partir de almidón de yuca	5
1.1.2 Alcohol carburante a partir de yuca	7
1.1.3 Biocombustible, Productos biodegradables y problemática alimenticia	10
1.2 CONTENIDO DE ALMIDÓN Y MATERIA SECA EN YUCA FRESCA	12
1.2.1 Análisis en laboratorios	13
1.2.2 Un hidrómetro	15
1.2.3 Método de la gravedad específica de las raíces de yuca	15
1.3 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA	17
1.3.1 Técnicas de medición de impedancia eléctrica en tejido biológico	18
1.3.1.1 Método a dos electrodos (2EM)	19
1.3.1.2 Método a cuatro electrodos (4EM)	20
1.3.1.3 Método a tres electrodos (3EM)	21
1.3.2 el bioimpedanciometro	22
1.3.3 Propiedades Eléctricas de los Tejidos	22
1.3.4 Las zonas de dispersión en los tejidos biológicos	23
1.4 ANTECEDENTES Y APLICACIONES DE LA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTRICA	26
1.5 NUESTRA INVESTIGACION	27
2. MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD DE UNA SOLUCIÓN ACUOSA DE ALMIDÓN AGRIO DE YUCA EN POLVO A DIFERENTES CONCENTRACIONES.	29
2.1 PLANTEAMIENTO Y DISEÑO DEL EXPERIMENTO	29

2.2	PRUEBAS PRELIMINARES	34
2.3	PROTOCOLO DE MEDICIONES	37
2.3.1	Calibración de la celda de medición	38
2.3.2	Especificaciones del protocolo de mediciones	46
2.4	RESULTADOS	47
2.5	DISCUSIÓN	55
3.	CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DE YUCA FRESCA	58
3.1	PLANTEAMIENTO DEL EXPERIMENTO	58
3.2	DISEÑO DE LA SONDA DE MEDICIÓN	59
3.3	PRUEBAS PRELIMINARES	63
3.4	PROTOCOLO DE MEDICIONES	68
3.4.1	Cosecha de las raíces	70
3.4.2	Empaque y Tratamiento	71
3.4.3	Especificaciones generales del cumplimiento protocolo de mediciones	75
3.5	CALIBRACION DE LA SONDA DE MEDICION	76
3.6	RESULTADOS	79
4.	BASE DE DATOS	87
5.	CONCLUSIONES	88
6.	RECOMENDACIONES	90
	BIBLIOGRAFÍA	91
	ANEXO A. PLANOS DE LAS DIMENSIONES DE LA SONDA DE MEDICIÓN UTILIZADA PARA LA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA EN RAÍCES DE YUCA	93
	ANEXO B. BASE DE DATOS DE LAS 104 RAÍCES ANALIZADAS EN EL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	99
	ANEXO C. RESULTADOS DE LOS ANALISIS DE ESPECTROFOTOMETRÍA REALIZADOS EN LAS MUESTRAS DE ALMIDÓN CARLOERBA, ALMIDÓN AGRIO DE YUCA DE USO PANADERO Y EN LAS RAÍCES DE YUCA FRESCA.	158

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Ingenio Yuquero en Puerto López, Meta_____	9
Figura 2. Torres de destilación de Ingenio Yuquero, propiedad de Petrotesting Colombia._____	10
Figura 3: Operaciones del Procesamiento de secado natural de las raíces de yuca_____	13
Figura 4. Espectrofotómetro._____	14
Figura 5 Espectro de Impedancia Eléctrica. Parte real de la impedancia eléctrica ($Re(Z)$) presentada en función de la frecuencia de la señal de entrada._____	18
Figura 6. Método de medida a dos electrodos (2EM)._____	19
Figura 7. Esquema de la impedancia de contacto (Z_{ep}) en las medidas superficiales._____	20
Figura 8. Configuración del método a cuatro electrodos (4EM)._____	21
Figura 9. Configuración del método a tres electrodos (3EM)._____	22
Figura 10: Trayectoria de la corriente eléctrica sinusoidal a bajas y altas frecuencias sobre un extendido celular_____	23
Figura 11: Comportamiento de la conductividad y permitividad de los tejidos biológicos._____	24
Figura 12. Recipientes plásticos con diferentes cantidades de almidón de yuca en polvo y almidón analítico en polvo CarloErba._____	30
Figura 13. Botellas de agua destilada y desmineralizada marca Quibi.____	31
Figura 14. Medidor de Conductividad y celda de medición de conductancia calculable, con un volumen de 117.81 ml._____	31

Figura 15. Analizador de Impedancia BAS-Zahner IM6 y software de análisis y adquisición de datos Thales, propiedad de la Corporación de la Investigación de la Corrosión (CIC)	32
Figura 16. Agitador de vidrio y vaso graduado de 120 ml, utilizados para preparar las soluciones acuosas de almidón en polvo de yuca.	32
Figura 17. Agitador Magnético. Plataforma donde se coloca el recipiente donde se prepara la solución y capsula que gira dentro del recipiente, para mantener su homogeneidad.	33
Figura 18. Jaula de Faraday Propiedad de la Corporación de la Investigación de la Corrosión (CIC). Montaje final del experimento para pruebas preliminares con almidón diluido en agua desmineralizada.	34
Figura 19. Conductividad Vs. Concentración de almidón. Coeficiente de correlación de 0.9972, una pendiente de 327.36 y constante aditiva de 5278.4.	36
Figura 20. Conductividad Vs Concentración. El valor de la pendiente es 129.08 y de la constante aditiva es 8518.3 para una constante aditiva de la forma $y=m*x + b$, donde m y b son constantes reales. El coeficiente de correlación es de 0.98332.	37
Figura 21. Espectro de impedancia eléctrica sin calibrar para las diferentes cantidades de solución salina (NaCl) al 0.9% diluida en agua desmineralizada.	39
Figura 22. Espectro de impedancia eléctrica calibrada aplicando regresión lineal a cada una de sus frecuencias de excitación.	43
Figura 23. Parte Imaginaria del espectro de impedancia eléctrica calibrado, para varias cantidades de solución salina diluida en agua desmineralizada.	44
Figura 24. Espectro de Impedancia Eléctrica (EIE) para varias cantidades de solución salina al 0.9%, calibrada con algoritmos genéticos.	45
Figura 25. EIE de varias concentraciones de solución salina al 0.9%, calibrada con algoritmos genéticos y luego suavizada con el comando polyfit de Matlab.	45

Figura 26. Espectro de Impedancia Eléctrica de soluciones acuosas a diferentes concentraciones de almidón de yuca utilizado en panadería.	47
Figura 27. Concentración de almidón Vs. Parte real de la Conductividad Compleja a una frecuencia de excitación de 10 Hz.	48
Figura 28. Concentración de almidón Vs. Parte real de la Conductividad Compleja a una frecuencia de excitación de 36.5 kHz. Tomando el mismo rango de concentraciones de almidón de yuca con las que hicieron los análisis en las pruebas preliminares.	49
Figura 29. Comportamiento del coeficiente de correlación con respecto a los valores de frecuencia de excitación.	49
Figura 30. Comportamiento de los valores de pendientes con respecto a la frecuencia de excitación.	50
Figura 31. Espectro de Impedancia Eléctrica de soluciones acuosas a diferentes concentraciones de almidón analítico CarloErba.	51
Figura 32. Concentración de almidón analítico CarloErba Vs. Parte Real de la Conductividad a una frecuencia fija de 26.3kHz.	52
Figura 33. Concentración del contenido de almidón analítico CarloErba Vs. Parte real de la Conductividad Compleja. Reduciendo el análisis al rango de las variaciones de concentración de paso constante.	53
Figura 34. Barrido de frecuencia del factor de correlación entre la concentración de almidón CarloErba y la parte real de su conductividad compleja.	54
Figura 35. Barrido de frecuencia de la pendiente de la función de regresión entre la concentración de almidón CarloErba y la parte real de su conductividad compleja.	54
Figura 36. Imágenes de la sonda de medición para la medición de Espectroscopia de Impedancia Eléctrica en raíces de yuca.	62
Figura 37. Posición longitudinal de una raíz de yuca y ubicación de las partes externas de una raíz de yuca	64

Figura 38. Medidas de Impedancia en tres partes de la raíz.	65
Figura 39. Espectros de Impedancia eléctrica en diferentes inserciones pero a la misma altura de una raíz de yuca.	65
Figura 40. Espectros de impedancia eléctrica medidas en las misma inserción a diferente lapsos de tiempo.	66
Figura 41. Imagen de una raíz de yuca con deterioro fisiológico un día después de haberle realizado la medición de EIE.	67
Figura 42. Efecto de la aplicación del pesticida Mertect sobre las medidas de impedancia eléctrica en las raíces de yuca.	67
Figura 43. Diagrama que muestra el flujo de actividades que comprende el método de conservación de la yuca en bolsas de polietileno.	69
Figura 44. Aptitud de las raíces de yuca para ser conservadas teniendo en cuenta el daño que hayan sufrido durante la cosecha.	70
Figura 45. Una buena práctica de cosecha es dejar adherido un pedazo de pedúnculo a la raíz.	71
Figura 46. Para aplicar el tratamiento del fungicida, se introduce la lanza de la aspersora en el interior de las bolsas y se bañan con ella bien todas las raíces.	73
Figura 47. Un corte en diagonal del fondo de la bolsa por donde drena el exceso de solución aplicada.	73
Figura 48. Imagen de la manera como se empaacan las raíces, marcando el empaque con información necesaria de la raíz.	74
Figura 49. Espectro de impedancia eléctrica sin calibrar de varias cantidades de solución salina al 0.9% disueltas en agua desmineralizada.	76
Figura 50. Espectro de Impedancia Eléctrica calibrado de diferentes cantidades de solución salina al 0.9%.	77
Figura 51. Espectro de Impedancia eléctrica de las 6 raíces analizadas con espectrofotometría para determinar su contenido de almidón.	80

Figura 52. Espectro de Impedancia Eléctrica de una raíz de yuca con %AL= 32.38%._____	81
Figura 53. Espectro de impedancia eléctrica ajustado al modelo Cole Cole de una yuca con %AL= 35.39%._____	82
Figura 54. Espectro de Impedancia Eléctrica ajustado al modelo de Cole Cole de una raíz con un contenido de almidón de 35.86%._____	82
Figura 55. Espectro de Impedancia Eléctrica ajustado al modelo de Cole Cole de una raíz con un contenido de almidón de 36.65%._____	83
Figura 56. Espectro de Impedancia Eléctrica ajustado al modelo de Cole Cole de una raíz con un contenido de almidón de 40.17%._____	83
Figura 57. Espectro de Impedancia Eléctrica ajustado al modelo de Cole Cole de una raíz con un contenido de almidón de 40.97%._____	84
Figura 58. Regresión lineal Entre el porcentaje de almidón y el contenido de materia seca en raíces de yuca fresca._____	86
Figura 59. Esquema de la base de datos de las 104 raíces con sus respectivos espectros ajustados al modelo Cole Cole e información relacionada a las muestras._____	87

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1: Rendimiento de la yuca Vs Otros cultivos, para la obtención de alcohol carburante. _____	9
Tabla 2: Variaciones en el rendimiento de la yuca con diferentes contenidos de materia seca. _____	17
Tabla 3. Soluciones acuosas a diferentes concentraciones de almidón de yuca, con sus respectivos valores de conductividad. _____	35
Tabla 4. Cantidad de solución salina (NaCl) al 0.9% diluido en agua desmineralizada, con sus respectivos valores de conductividad y resistividad eléctrica. _____	39
Tabla 5. Valores de las constantes multiplicativas y aditivas. _____	41
Tabla 6. Cuadro comparativo entre los diferentes materiales para el diseño de electrodos. _____	60
Tabla 7. Análisis de la Composición química porcentual de acero inoxidable tipo 304. _____	61
Tabla 8. Cambios en la calidad de las raíces almacenados en bolsas de polietileno de 4kg tratados con Mertect 500 S. _____	75
Tabla 9. Valores de las constantes multiplicativas y aditivas para la calibración de la sonda de medición para raíces de yuca fresca. _____	78
Tabla 10. Parámetros del modelo Cole - Cole de las raíces de yuca y sus respectivos valores de %AL. _____	85

RESUMEN

TÍTULO: MEDICIÓN DEL CONTENIDO DE ALMIDÓN Y MATERIA SECA EN RAÍCES DE YUCA FRESCA BASADA EN ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA*

AUTOR: ALBERTO ELÍAS ÁLVAREZ ÁLVAREZ **

PALABRAS CLAVES: Raíces de yuca fresca, Contenido de almidón (%AL), Contenido de materia seca (%M.S.), Método de gravedad específica, Espectroscopia de Impedancia Eléctrica (EIE), Espectrofotometría, biocombustibles.

DESCRIPCIÓN: La creciente demanda de cultivos para la elaboración de biocombustibles está reduciendo de manera alarmante la oferta de los productos alimenticios, por lo que muchos expertos están sugiriendo la implementación de nuevas tecnologías para la medición de indicadores de calidad que permitan una óptima clasificación de cosechas, en búsqueda de lograr una mayor eficiencia de los procesos agroindustriales de los alimentos en conflicto como el maíz, la yuca, el arroz, entre otros.

El contenido de almidón (%AL) y materia seca (%M.S.) son los indicadores de calidad de la yuca. En éste trabajo se evaluó la viabilidad de utilizar la Espectroscopia de Impedancia Eléctrica (EIE) como método para la determinación del %AL y %M.S, para lo cual se realizaron mediciones de conductividad eléctrica y de EIE en soluciones acuosas de almidón agro de yuca, almidón soluble CarloErba, y en raíces de yuca fresca.

De los resultados obtenidos en las soluciones acuosas se concluyó que las conductividades medidas inyectando corriente a frecuencias entre 10Hz y 80kHz aproximadamente, son directamente proporcionales con sus respectivas concentraciones de almidón, con un coeficiente de correlación de 0.92 para el almidón agro de yuca y de 0.99 para el almidón soluble CarloErba.

Por otro lado, los espectros de los tubérculos fueron ajustados al modelo Cole-Cole y se encontró que la conductividad a baja frecuencia es directamente proporcional al %AL obtenido a través de análisis de espectrofotometría, con un coeficiente de correlación de 0.9133.

* Trabajo de grado en la modalidad de investigación.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Físico & Ing. David Alejandro Miranda Mercado, MsC.

SUMMARY

TITLE: MEASUREMENT OF STARCH CONTENT AND DRY MATTER IN FRESH CASSAVA ROOTS USING ELECTRICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY (EIS)* .

AUTHOR: ALBERTO ELÍAS ÁLVAREZ ÁLVAREZ **

KEY WORDS: Fresh cassava roots, Starch content (%SC), Dry Matter Content (%DM), specific gravity test, Electrical Impedance Spectroscopy (EIS), spectrophotometry, biofuel.

DESCRIPTION: The growing demand of crops for the biofuels manufacturing is dramatically reducing the supply of foodstuffs; because of this, many experts are suggesting the implementation of new technologies to measure the quality indicators involved in the classification of crops. The idea is to improve the agro-industrial processes of foods that are experiencing more problems such as corn, cassava, and rice among others.

The starch (%SC) and dry matter content (%DM) are the quality indicators of cassava. This investigation assessed the feasibility of the Electrical Impedance Spectroscopy (EIS) as a method to estimate the starch (%SC) and dry Matter content (%DM) in fresh cassava roots. The measurements of electrical conductivity and Electrical Impedance Spectroscopy were performed in aqueous solutions of sour cassava starch and CarloErba soluble starch, and fresh cassava roots

From the results obtained in aqueous solutions was found that the electric conductivities measured with current frequencies between 10Hz and 80 kHz approximately, are directly proportional to their respective starch concentrations; with a correlation coefficient of 0.92 for sour cassava starch and 0.99 for the CarloErba soluble starch.

On the other hand, for the impedances measured in the tubers, which were fitted into Cole-Cole model, it was found that the low-frequency electric conductivity is directly proportional to %SC obtained through analysis of spectrophotometry, with a correlation coefficient of 0.9133.

* Degree Project under research modality.

** Faculty of Physics-Mechanical Engineering. Electrical and Electronic Engineering and of Telecommunication School. Director: Physicist & Electronic Engineer David Alejandro Miranda Mercado, MSc.

INTRODUCCIÓN

La yuca es una de las fuentes alimenticias más importantes en las zonas tropicales del mundo, teniendo un sin número de aplicaciones que van desde el simple consumo humano hasta su procesamiento para la obtención del alcohol carburante, pasando por su importante papel en las industrias de panadería, aglutinantes, pegantes, concentrados alimenticios, *snacks*, plásticos biodegradables, entre otras aplicaciones (Ospina J., 2002).

Debido a la gran expectativa y afán de buscar prontas soluciones a problemáticas ambientales como el calentamiento global y el cambio climático, son los plásticos biodegradables y la obtención de alcohol carburante las aplicaciones de la yuca de mayor promesa en el futuro cercano, lo que llevaría a un alza de los precios del tubérculo para consumo humano y sus derivados alimenticios, como ha ocurrido con el azúcar desde que inicio el uso de la caña para obtener etanol. Algunos analistas hacen un llamado a los gobiernos para que se empiecen a establecer leyes que permitan regular el uso de alimentos para la obtención de combustibles limpios y evitar así un desabastecimiento catastrófico.

La gran mayoría de las aplicaciones industriales de la yuca implican un previo proceso de secado de las raíces, y ante un mundo que cada día exige los más altos estándares de calidad y mayor eficiencia de los procesos, la industria yuquera se ha preocupado por contar con indicadores para seleccionar los mejores tubérculos que permitan lograr mayor eficiencia en el secado, por lo que a través de publicaciones como las del CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical) se han establecido entre los agricultores e industriales del sector al porcentaje de almidón (%AL) y el porcentaje de materia seca (%M.S) como los indicadores de calidad de las raíces de yuca fresca. Estos

indicadores se miden generalmente a través de análisis químicos, hidrometría, ó del método de gravedad específica; siendo éste último el más utilizado, ya que las herramientas que se necesitan son de fácil acceso en cualquier finca o planta almidónela (un machete, una cuerda, una balanza, una mesa, una canasta metálica y un balde de agua). EL %AL y el %M.S podrían ser la ficha clave para la creación de un herramienta legislativa que permita regular que sólo las raíces de alta eficiencia sean las usadas para la elaboración de bioplásticos y biocombustibles, lo que haría necesario contar con nuevas y mejores técnicas para la medición de éstos indicadores. (Ospina J., 2002).

Esta investigación es el primer paso de una serie de estudios y aplicaciones de tecnología de instrumentación electrónica al diagnóstico de cultivos a través de señales eléctricas, buscando que el producto final sea monitoreado electrónicamente desde su nacimiento, siguiendo paso a paso su proceso de desarrollo, lo que ayudaría establecer criterios para la optimización de cultivos, lo cual mejora la eficiencia de los cultivos, logrando por ejemplo, obtener más beneficios en menos hectáreas cultivadas.

El presente trabajo consistió en realizar mediciones del espectro de impedancia eléctrica en raíces de yuca fresca, con el objetivo de evaluar dicha técnica para medir el contenido de almidón y materia seca en el tubérculo, diseñando un protocolo de mediciones con dispositivos del grupo CIMBIOS (Grupo de Investigación de la ciencia de los Materiales Biológicos y semiconductores) y la Corporación de Investigación de la Corrosión, CIC, en la sede Guatiguará de la UIS. Con las medidas se conforma una base de datos que posteriormente se analiza para describir una relación numérica entre la espectroscopia de impedancia eléctrica y el contenido de almidón y materia seca en las raíces.

En la Universidad Industrial de Santander el grupo de investigación CIMBIOS ha realizando diferentes tipos de estudios a partir de Espectroscopia de Impedancia Eléctrica e incluso ya se han diseñado dispositivos para tal fin. También a nivel internacional se ha aplicado la espectroscopia de impedancia eléctrica (EIS) para diferentes aplicaciones clínicas y agrícolas.

El trabajo está conformado por cuatro capítulos. El primero presenta la yuca como producto industrial y los porcentajes de materia seca y almidón como sus indicadores de calidad; la Espectroscopia de impedancia eléctrica y sus aplicaciones para la caracterización de tejidos, y por último se plantea lo que se pretende hacer para evaluar la viabilidad de la Espectroscopia de Impedancia Eléctrica para la medición del contenido de almidón y materia seca en raíces de yuca fresca. El segundo expone el planteamiento y diseño de un experimento que consiste en obtener el Espectro de Impedancia Eléctrica de una solución acuosa a varias concentraciones de almidón soluble de yuca, para luego analizar los resultados en miras de plantear hipótesis y planteamientos para las posteriores mediciones en las raíces de yuca. En el tercero se diseña la sonda y el protocolo de mediciones en las raíces de yuca, el capítulo concluye con un análisis de los resultados obtenidos. En el capítulo final se sacan las conclusiones del trabajo, observaciones y recomendaciones para trabajos futuros.

1. FUNDAMENTO TEORICO

1.1 YUCA: GENERALIDADES Y APLICACIONES

La yuca (*Manihot esculenta* Crantz), junto con el maíz, la caña de azúcar y el arroz, constituyen las fuentes de energía más importantes en las regiones tropicales del mundo. Según el Centro Internacional de Agricultura Trópica, CIAT, Colombia es el tercer productor de yuca más importante en América Latina después de Brasil y Paraguay. En 1999, Brasil produjo casi 21 millones de toneladas de yuca, con un rendimiento promedio de 12.6 t/ha; Paraguay produjo 3.5 millones de toneladas, con un rendimiento promedio de 12.8 t/ha; Colombia, casi 2 millones, con un rendimiento promedio de 9.3 t/ha (Ospina J., 2002).

Las raíces de yuca se caracterizan por su gran diversidad de usos entre los que se destacan el consumo humano, animal y el procesamiento de su almidón para fines industriales. Para el consumo humano la presencia de glucósidos cianogénicos en las raíces es un factor determinante en el uso que se le dará a la raíz. Las variedades “dulces” tienen niveles bajos de éstos glucósidos y pueden ser consumidas de manera segura después del proceso de cocción. En Colombia es común su preparación en sancochos, sopas, atoles, croquetas precocidas y congeladas, los *snacks*, carimañolas, los *chips* de yuca frita, similares a las papas fritas, pero con la ventaja adicional de que el producto absorbe menos aceite en su preparación, haciéndola más atractiva desde el punto de vista de la salud humana. El tiempo de ebullición requerido depende de la variedad (oscila entre 10 a 40 minutos).

Por su parte las “amargas” tienen niveles elevados de glucósidos cianogénicos, lo que hace necesario un proceso sofisticado para que sean aptas para el consumo humano, por tal motivo estas variedades son generalmente utilizadas para fines industriales por su rendimiento y alta resistencia a plagas. Es común

su uso en postres instantáneos, flanes, natillas, carnes frías, salsas, productos de panadería y pastelería, pan de yuca, pan de bonos, buñuelos, helados, compotas; aprovechando sus propiedades como espesante, relleno aglutinante, estabilizante y mejorador de textura (Ospina J., 2002).

Una de las aplicaciones más importante de la yuca es la producción de almidón, que por sus propiedades particulares como la proporción de amilas y amilopectina, y el tamaño del granulo lo hacen optimo para ciertos proceso industriales. Incluso la demanda de éste ha aumentado, ya que en algunos casos, las modificaciones químicas que hay que realizar en su procesamiento son más sencilla y menos costosas que cuando se efectúa a partir de otros como el del maíz, la papa o el arroz.

El almidón dulce o nativo se utiliza en la fabricación de productos intermedios, como maltodextrinas, maltosa, jarabe de glucosa, dextrosa y levaduras, entre otros; solicitados por la industria de las confiterías, panaderías y bebidas gaseosas. Además se augura un gran crecimiento de uso en la fabricación de pegantes ya que muestra mayor poder adhesivo que los pegantes de maíz que se utilizan en la elaboración de colas textiles, e incluso se le ha encontrado aplicación en la fabricación de desechables biodegradables, como materia de embalaje, etiquetas, papel de envolturas y cintas para humedecer (Ospina J., 2002).

1.1.1. Bioplásticos a partir de almidón de yuca

Gracias a un trabajo de investigación desarrollado por el Dr. Héctor Samuel Villada, como tesis de grado para obtener su título de doctorado (Ph.D.), bajo la dirección del Profesor Harold Acosta Zuleta del Grupo de Investigación en Ciencia y Tecnología de Biomoléculas de Interés Agroindustrial – CYTBIA de la Universidad del Valle, se logró desarrollar por primera vez un polímero basado

en almidón de yuca. Este polímero sirve para la fabricación de bolsas plásticas y productos desechables que no afectan al medio ambiente, contrario al polímero convencional fabricado a partir del petróleo que se encuentra actualmente en el mercado en forma de envases, tuberías, recubrimiento de cables, objetos moldeados, como el polietileno y poliuretano, y que está compuesto por cadenas de carbono que no se rompen por su estructura alterada, lo cual limita su degradación.

Una característica fundamental es que el plástico de almidón de yuca es extensible térmicamente durante un mes después de su producción. Es decir, puede estirarse y de inmediato recuperar su forma, lo cual se conoce como 'memoria' del polímero. Durante ese mes, el material será reutilizable y no va a ser necesario reciclarlo o someterlo a otros procesos de transformación que generen costos extras. Los polímeros con efecto térmico de memoria son materiales nuevos conocidos como 'inteligentes', cuyas aplicaciones recientemente son estudiadas en los diferentes campos de la ciencia, por ejemplo, en medicina, comunicaciones y entretenimiento.

En el proyecto que contó con el apoyo de la Universidad del Valle, la Universidad del Cauca, CLAYUCA del CIAT y el CDT-ASTIN del SENA de CALI, se extrajo el almidón de la yuca mediante los procesos tradicionales: pelar el tubérculo, molerlo y extraer el almidón que, luego de sedimentarse, pasa a unos tanques fermentadores durante 20 días. Una vez fermentado, se seca al sol y se mezcla con agua y otras sustancias (plastificantes) de origen natural, que facilitan el deslizamiento de las moléculas del almidón. Luego se lleva a una máquina extrusora, que le da forma a la masa plástica y la saca por una abertura especialmente dispuesta. De allí se obtienen cintas 'extrudidas' que luego se transforman en pequeñas 'lentejas', las cuales sirven para la fabricación de los productos. Este proceso de transformación de polímeros se

practica en países como Estados Unidos, Japón, Finlandia y Alemania, a partir de almidones como el de fécula de maíz.³

1.1.2 Alcohol carburante a partir de yuca

Luego de la crisis petrolera de los años 70, Brasil hizo planes para sustituir parte del combustible derivado del petróleo con alcohol producido a partir de caña de azúcar, lo que ha demostrado ser un considerable sustento con el pasar de los años, tanto que Brasil produjo en 1980, suficiente alcohol para sustituir 20% de la gasolina necesaria para sus automóviles, convirtiéndose en el primer país en ensamblar a gran escala autos con motores que funcionaban con alcohol carburante en altos porcentajes. En los años 90 se redujo el interés por esta estrategia pero con el encarecimiento nuevamente del hidrocarburo y las problemáticas ambientales, se reactivó nuevamente el interés de producir etanol como sustituto del petróleo. Es inevitable que a medida que el suministro de productos derivados del petróleo sea más difícil, la demanda de sustitutos será más constante, a esto se le suma el comercio de emisiones de carbono propiciado por el protocolo de Kyoto y que promete ser una oportunidad agroindustrial para los países en vía de desarrollo (Ospina J., 2002).

En Colombia, desde hace poco se ha empezado a distribuir gasolina con 10% de alcohol en algunas de las principales ciudades del país en cumplimiento de la Ley 693 de 2001, además la ley 788 de 2002 exonera a los productores de etanol y a los agricultores del pago de impuestos, como: el impuesto Global, IVA, sobretasa. A esto se le suma los actuales programas de oxigenación que empezaron produciendo 35 millones de litros de etanol mensuales, pero con la extensión de estos programas a todo el país se han alcanzado la meta de 43 millones de litros de etanol a mitad del 2007 y al final del año cerca de los 108 millones de litros mensuales⁴, buscando beneficios como la reducción del

³ <http://www.universia.net.co/investigacion/destacado/patente-para-plastico-de-almidon-de-yuca.html>.
Última visita 8 de abril del 2008.

⁴ GRUPO PETROTESTING COLOMBIA. Alcohol Carburante a partir de Yuca. http://www.clayuca.org/clayucanet/edicion10/presentaciones/petrotesting_2007.pdf.
Última visita 8 de abril del 2008.

efecto invernadero, disminución de los contaminantes de la gasolina, contribución a la autosuficiencia energética, generación de empleo aumentando la producción agrícola, generación de polos de desarrollo regional, sustitución de cultivos ilícitos, incrementos en la rentabilidad de los complejos agroindustriales, etc⁵.

Si bien el alcohol carburante que se está consumiendo en Colombia se obtiene en su mayoría a partir de la caña de azúcar, se espera que en los próximos años una manera muy creciente será a partir de la yuca, por su capacidad de crecer en suelos marginales, su facilidad de cultivo, la resistencia a plagas, el alto conocimiento emperico y teórico del manejo de cultivos. La tabla 1 hace una comparación entre el rendimiento de la yuca con otros cultivos en la producción de alcohol carburante.

Como se puede ver en la tabla 1, la yuca en un escenario esperado presenta prácticamente igual rendimiento que los cultivos de caña de azúcar, y aunque la remolacha es la de mayor rendimiento, su vulnerabilidad al ataque de plagas la hacen poco atractiva para los ingenios del trópico, por lo que se concluye que hay altas posibilidades que dentro de poco tiempo la yuca sea la segunda opción para obtención de alcohol carburante en el país después de la caña de azúcar.

Por su parte el grupo Petrotesting Colombia ha iniciado desde el 2005 un ambicioso proyecto para la obtención de alcohol carburante a partir de yuca, construyendo un ingenio yuquero valorado en más USD \$10 millones, ubicado en Puerto López Meta, generando 150 empleos directos, 30 ton/ha de yucas en 3 variedades sembradas comercialmente, 60 variedades en estudios, 3.6 ha de

⁵ GRUPO PETROTESTING COLOMBIA. Alcohol Carburante a partir de Yuca. http://www.clayuca.org/clayucanet/edicion10/presentaciones/petrotesting_2007.pdf. Última visita 8 de abril del 2008.

Yuca/día, 2300 ha para cultivar en rotaciones con Maíz, Soya, Crotalaria, sorgo dulce, etc. Y se tiene proyectado producir 1'050'000 Lts/Día, aproximadamente 63000 ha de Yuca/año, generando alrededor de 8000 empleos directos (45 Jornales/Ha/año).

Tabla 1: Rendimiento de la yuca Vs Otros cultivos, para la obtención de alcohol carburante.

TIPO DE CULTIVO	CULTIVO (Ton/ha)	ALCOHOL (lts/ton)	RENDIMIENTO (Lts/ha)
Caña (Colombia)	120	75	9 000
Caña (Brasil)	85	83	7 080
Caña (Ecuador)	75	75	5 625
Yuca (Escenario Esperado)	45	200	9 000
Yuca (Escenario medio)	40	200	8 000
Yuca (Escenario conservador)	30	200	6 000
Remolacha	100	100	10 000
Maíz	10	400	4 000
Sorgo Dulce	40	55	2 200

Fuente: Grupo Petrotesting Colombia³.

Figura 1. Ingenio Yuquero en Puerto López, Meta.



Fuente Grupo Petrotesting Colombia.

Figura 2. Torres de destilación de Ingenio Yuquero, propiedad de Petrotesting Colombia.



Fuente: Grupo Petrotesting Colombia³.

1.1.3. Biocombustible, Productos biodegradables y problemática alimenticia.

El espíritu ambientalista alimentado ha logrado tener mayor acogida en los últimos años, desde que sus pronósticos acerca del calentamiento global y el cambio climático están empezando a hacerse realidad. Esto ha llevado al surgimiento de las industrias cuyo mercado es precisamente los ambientalistas que fortalecido con rigurosas legislaciones ha logrado imponer la cultura de la conservación del medio ambiente.

Desde la firma del Protocolo de Kioto, la intención de reemplazar los combustibles fósiles por los llamados biocombustibles, y el uso de productos biodegradables ha disparado el desarrollo de una nueva industria a nivel mundial, que usa como materia prima las cosechas de maíz, trigo, yuca, sorgo,

Palma africana, entre otros; para la elaboración de etanol, biodiesel y bioplásticos.

Sin embargo a medida que crece la demanda de los éstos bioproductos crecen las inversiones para su producción y con ellas son más las hectáreas de tierras que se dejan de cultivar para fines alimenticios, para ser cultivadas para la producción de biocombustibles. Pero lo más preocupante aun, es que los severos efectos del cambio climático y el calentamiento global están reduciendo el número de hectáreas de tierras aptas para cultivar, lo que ha llevado a una reñida competencia entre cultivos energéticos (para la elaboración de biocombustibles) y los cultivos para comestibles, lo que ha traído consigo el encarecimiento alarmante de los productos de la canasta familiar, en especial en los países en vías de desarrollo. Según informes de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) las subidas de los precios de los productos agrícolas escalaran peldaños hasta alcanzar aumentos de más del 50% en los próximos 10 años, lo cual suena apocalíptico para un mundo que ha sido derrotado en su batalla para la erradicación del hambre.⁶

Por su parte los expertos sugieren que es necesaria la implementación de nuevas tecnologías en búsqueda de la optimización de los procesos agroindustriales, con el objetivo de lograr una mayor eficiencia y a reducir el número de hectáreas de cultivo requeridas para obtener determinada cantidad de materia prima para la elaboración de bioproductos. Para esto es necesario el establecimiento de indicadores de calidad que permitan unos mejores criterios de clasificación de las cosechas, incluso haciendo un seguimiento y caracterización desde el mismo momento en que nacen los cultivos, para así pronosticar con anterioridad, el destino que tendrían las cosechas, ya sea para la elaboración de comestibles o para procesos industriales no alimentarios.

⁶ <http://www.fao.org/newsroom/es/news/2007/1000620/index.html>. Última visita: Abril 8 del 2008.

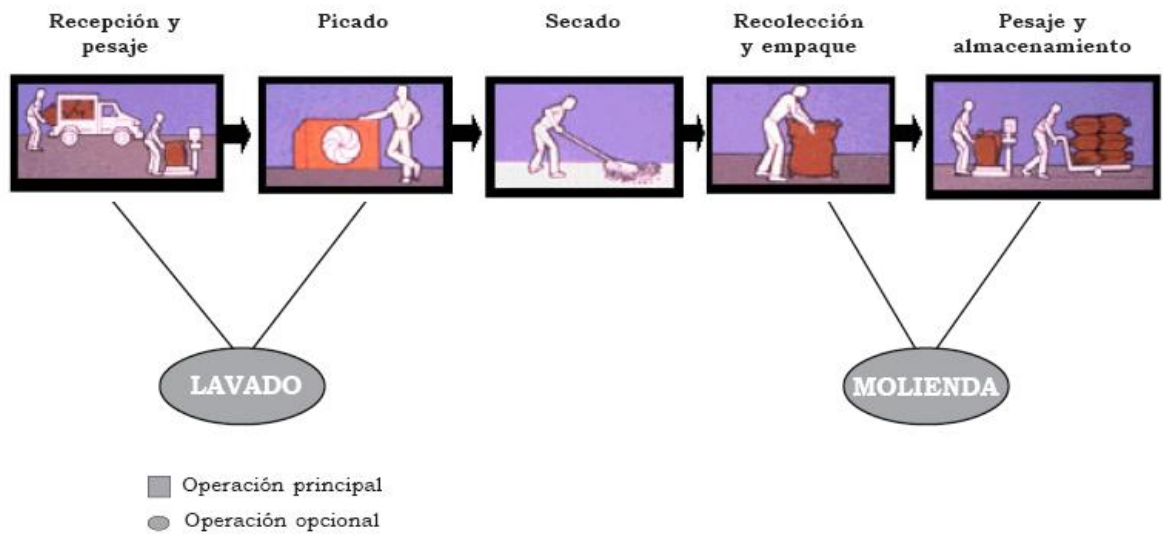
En el caso de Colombia, el alza en los precios de la azúcar desde que se inició la producción masiva de etanol en el país, es muestra de la fragilidad del sistema agropecuario nacional ante el surgimiento de la industria de los biocombustibles, y ante la inminente utilización de la yuca para la obtención de biocombustibles se presiente lo peor, ya que el tubérculo hace parte de la dieta de la mayoría de las regiones del país que sumándose a la alarmante escasez de arroz, parece condenar a la desaparición de los carbohidratos de la mesa de los Colombianos.

Por su parte la CIAT ya ha logra establecer al contenido de almidón (%AL) y materia seca (%MS) como los indicadores de calidad de las raíces de yuca fresca y como se mostrará a continuación, se puede lograr una mayor eficiencia de los procesos pos cosecha de la yuca, haciendo una clasificación tomando a éstos como criterios de selección.

1.2 CONTENIDO DE ALMIDÓN Y MATERIA SECA EN YUCA FRESCA

Para prácticamente todos los usos industriales de la yuca, las raíces deben someterse primero a un proceso de secado, que puede hacerse mediante métodos naturales o artificiales. En el secado natural se aprovecha la energía solar y la acción del aire, lo que restringe su uso en las épocas del año en que hay lluvias, sin embargo el secado con energía solar es, generalmente, un método económico y muy útil en los sitios en que las otras fuentes de energía son escasas o muy costosas. El secado artificial se hace a través de secadores rotatorios o de transportador, secadores de capa estática, compresores de aire caliente forzado que funcionan con electricidad, carbón, gasolina, A.C.P.M ó GAS (Ospina J., 2002) (Ver figura 3).

Figura 3: Operaciones del Procesamiento de secado natural de las raíces de yuca.



Fuente: (Ospina J., 2002).

El porcentaje de materia seca (%M.S.), y el contenido de almidón (AL%) de las raíces de yuca se denominan comúnmente como indicadores de calidad y varían mucho entre las variedades de la especie. Se ha observado que estos factores están muy ligados con el contenido de potasio en el suelo, la edad del cultivo, el clima (precipitaciones y humedad del suelo). Dependen también de la severidad de los ataques de plagas y de otros agentes exfoliadores como el granizo. Para calcular al momento de la cosecha el rendimiento %M.S. de las raíces a partir del rendimiento de raíces frescas (RRF), se usan generalmente en la actualidad los siguientes métodos:

1.2.1 Análisis en laboratorios

Que por lo general arrojan valores muy precisos, pero son demorados y complejos. El más común en los laboratorios de alimentos es el análisis de espectrofotometría, que consiste en medir cantidades relativas de luz absorbida por una muestra, en función de la longitud de onda.

Cada componente de la solución tiene su patrón de absorción de luz característico. Comparando la longitud de onda y la intensidad del máximo de absorción de luz de una muestra versus soluciones estándar, es posible determinar la identidad y la concentración de componentes disueltos en la muestra (solución incógnita).

Las ventajas de la espectrofotometría sobre otros métodos analíticos de laboratorio son varias: es rápida, precisa, versátil, fácil de usar y eficiente en costo. Los espectrofotómetros se han mejorado en precisión y versatilidad en los últimos años con los avances de tecnología, y hoy se consideran indispensables en un laboratorio de química analítica.

Figura 4. Espectrofotómetro.



Fuente: es.wikipedia.org

La espectrofotometría se usa para diversas aplicaciones, como:

- a. Análisis cuantitativo y cualitativo de soluciones desconocidas en un laboratorio de investigación.

- b. Estandarización de colores de diversos materiales, como plásticos y pinturas.
- c. Detección de niveles de contaminación en aire y agua.
- d. Determinación de trazas de impurezas en alimentos y en reactivos.

Un espectrómetro (Ver figura 4) típico posee cuatro componentes básicos: una fuente de radiación que tiene intensidad constante en el rango de longitud de onda que cubre (usualmente es lámpara de tungsteno para luz visible, y deuterio para ultravioleta), un compartimiento para la muestra, un monocromador que separa la banda de longitud de onda deseada del resto del espectro y la dispersa al compartimiento de la muestra, y un foto detector, que mide cuantitativamente la radiación que pasa por la muestra.

En general, los espectrómetros miden en % de transmitancia (T) y absorbencia (A). El porcentaje de transmitancia se refiere a la cantidad de radiación que pasa a través de la muestra y alcanza el detector. Una solución límpida, no absorbente, mostrara una lectura de 100% de transmitancia en un espectrofotómetro calibrado. Las unidades de absorbencia van de 0 a 2. La absorbencia se relaciona con la transmitancia como

$A = -\log 1/T$, (logaritmo decimal).

1.2.2 Un hidrómetro

Similar al que se emplea en los tubérculos de papa; al parecer, puede adaptarse a las raíces de yuca.

1.2.3 Método de la gravedad específica de las raíces de yuca

Consiste en tomar muestras iguales con un peso entre 3kg a 5kg, se pesan en una balanza, el valor de este peso se le llama “Peso fresco de raíces en el aire” (PFRAi); realizada ésta operación, se colocan las raíces en una canastilla de malla metálica y se sumerge completamente en un recipiente con agua de tal manera que no se toquen con nada, como tampoco la cuerda de la balanza que sostiene a la canasta. El dato que se toma de la balanza se le llama “Peso

fresco de raíces en el agua” (PFRAg). Luego a través de la siguiente expresión se obtiene el valor de gravedad específica:

$$GE = \frac{PFRAi}{PFRAi - PFRAg}$$

Teniendo el valor de la gravedad específica, el valor del contenido de materia seca se obtiene así:

$$\%M.S. = 158.26 \cdot (GE) - 142.05 .$$

Y el contenido de almidón es simplemente

$$\%AL = \%M.S. - 2\%$$

Por su practicidad y por estar al alcance del agricultor o en una almidónela es el método más utilizado, aunque cabe anotar que éste método muestra mayor precisión sólo en raíces de mas de 8 meses de sembradas (Dominguez C., 1983) y luego con la experiencia se puede lograr mayor precisión con respecto a los análisis químicos.

Debido a que existe una simple relación numérica entre %AL Y %MS, por lo que teniendo una se obtiene fácilmente la otra, desde ahora en adelante se hablará solamente de %AL, sabiendo que implícitamente se está hablando también de %MS.

La selección de raíces con alto contenido de almidón y materia seca es, por lo tanto, importante por las siguientes razones: menos tiempo de secado, menor requerimiento de mano de obra por tonelada de yuca seca, y en el caso de secado artificial, se disminuye el costo de combustible. En la tabla 2 se muestra como varía el rendimiento de la yuca con diferentes contenidos de materia seca:

Tabla 2: Variaciones en el rendimiento de la yuca con diferentes contenidos de materia seca.

Contenido de materia seca en raíces de yuca fresca, [%]	Cantidad de yuca fresca requerida para producir 1 ton de yuca seca con 10% de humedad, [ton]	Rendimiento [%]
30	3.0	33.3
35	2.6	38.5
40	2.3	43.5

Fuente: (Dominguez C., 1983)

1.3 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA

La impedancia eléctrica es la oposición que ejerce un cuerpo, un tejido biológico por ejemplo, al paso de una corriente eléctrica a través de él.

La impedancia (Z) es un número complejo definido como la relación entre la tensión (V) y la corriente (I). Para un cuerpo homogéneo e isótropo, la impedancia está en función de sus propiedades eléctricas (Conductividad y permitividad) y factores geométricos determinados por el factor de celda.

$$Z = k \frac{1}{\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r} = k \frac{1}{\sigma^*} = k\rho^* = k(r + jx) = k |\rho^*|_{fase(\rho^*)}$$

k = Factor de Celda (m¹)

σ = Conductividad eléctrica (S/m)

j = Símbolo imaginario

ω = Frecuencia

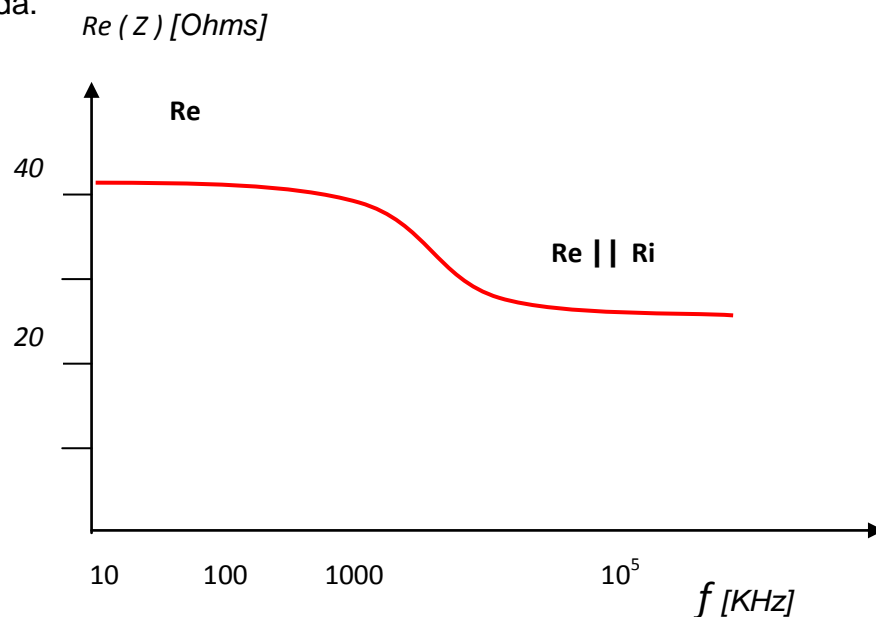
ε₀ = Permitividad del vacío.

ε_r = Permitividad relativa.

La parte real de la impedancia eléctrica se llama componente activa y la parte imaginaria se le conoce como componente reactiva.

El espectro de impedancia eléctrica es el término acuñado en bioingeniería para referirse a la resistividad eléctrica medida con excitación sinusoidal a diferentes frecuencias (Figura 5) (Grimnes S. y Martinsen O., 2000).

Figura 5 Espectro de Impedancia Eléctrica. Parte real de la impedancia eléctrica ($Re(Z)$) presentada en función de la frecuencia de la señal de entrada.



Fuente: (Celis J. y Jara J., 2007).

1.3.1 Técnicas de medición de impedancia eléctrica en tejido biológico

En las medidas de impedancia eléctrica en tejido biológico existen dos técnicas comúnmente utilizadas: el método a dos electrodos o bipolar (2EM, del inglés 2 Electrode Method) y el método a cuatro electrodos o tetrapolar (4EM, del inglés 4 Electrode Method). Una variante de los métodos anteriores es el método a 3 electrodos (3EM, del inglés 3 Electrode Method). Cada uno se describe a continuación. (Celis J. y Jara J., 2007).

1.3.1.1 Método a dos electrodos (2EM)

En este método, se hace circular una corriente (I_o) a través de dos electrodos, los cuales presentan una impedancia (Z_e) cuyo valor es usualmente mayor que el de la impedancia de interés entre los electrodos, Figura 6. El detector es conectado a través de los mismos electrodos y el voltaje presente (V_o) es una función de la impedancia entre los electrodos y de los cambios presentes debidos a los eventos fisiológicos (Ackmann J., 1984). Por lo tanto, la impedancia medida es:

$$Z = \frac{V_o}{I_o} = Z_{e1} + Z_{e2} + Z_x$$

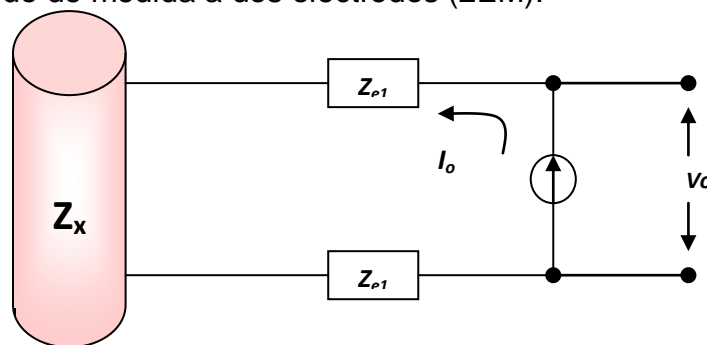
Sí los electrodos tienen las mismas características, entonces

$$Z_{e1} = Z_{e2}$$

Y por lo tanto, la impedancia medida es

$$Z = \frac{V_o}{I_o} = 2Z_e + Z_x$$

Figura 6. Método de medida a dos electrodos (2EM).

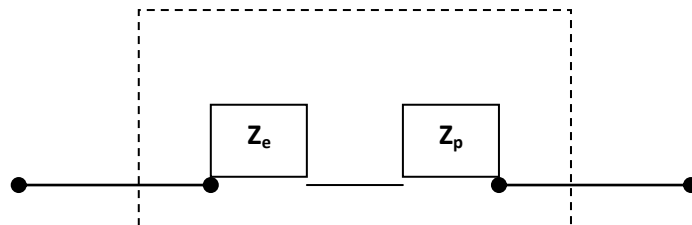


Fuente: (Celis J. y Jara J., 2007)

Al realizar medidas con electrodos superficiales (cutáneos) se debe considerar que la impedancia de la piel (Z_p) está en serie con la impedancia del electrodo (Z_e). Esto da lugar a una impedancia de contacto electrodo-piel (Z_{ep}) mucho mayor que la impedancia del tejido, Figura 6.

En el rango de frecuencia de la relajación β , el valor típico de la impedancia de la piel (Z_p) puede ser de 2 a 10 veces el valor del tejido de interés (Rosell J. et al 1988). Por lo tanto, para obtener valores de impedancia eléctrica que puedan ser utilizados para proporcionar información acerca del tejido de interés, la contribución de la impedancia de la piel debe ser eliminada. Esto se lleva a cabo con el empleo del método de medida de impedancia eléctrica a cuatro electrodos.

Figura 7. Esquema de la impedancia de contacto (Z_{ep}) en las medidas superficiales.



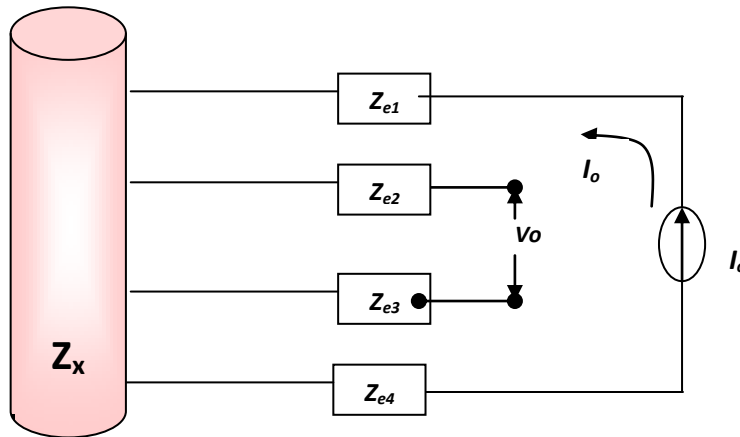
FUENTE: (Celis J. y Jara J., 2007).

1.3.1.2 Método a cuatro electrodos (4EM)

Este método consiste en aplicar una corriente (I_o) a través de dos electrodos y detectar la tensión en otros dos electrodos distintos, como se muestra en la Figura 8.

Con este método se consigue eliminar la impedancia de los electrodos, siempre y cuando los electrodos empleados tengan una impedancia pequeña en comparación con la impedancia de entrada del circuito utilizado para detectar la tensión (V_o) y no provoquen una saturación de los circuitos que inyectan la corriente (I_o). En el caso de realizar medidas superficiales, también se reduce la impedancia de la piel ya que queda en serie con cada electrodo (Ackmann J., 1984).

Figura 8. Configuración del método a cuatro electrodos (4EM).

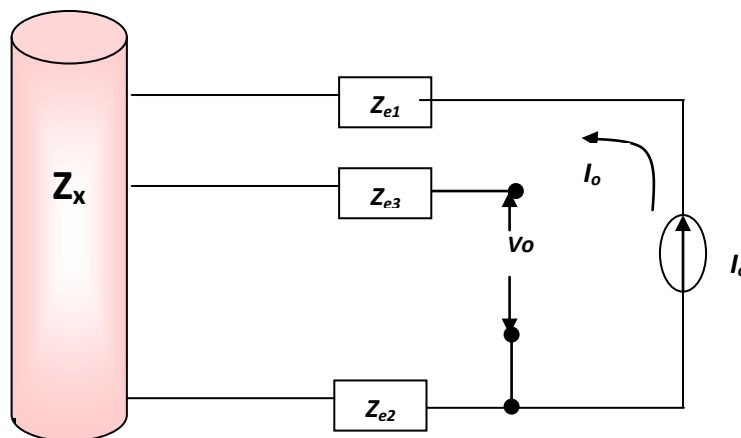


FUENTE: (Celis J. y Jara J., 2007).

1.3.1.3 Método a tres electrodos (3EM)

Este método consiste en aplicar una corriente (I_o) a través de dos electrodos: un electrodo inyector de corriente (Z_{e1}) y un electrodo de referencia (Z_{e2}). Esta corriente fluye a través del tejido. El voltaje (V_o) se detecta entre un tercer electrodo (Z_{e3}) y el electrodo de referencia (Z_{e2}), Figura 9. La diferencia de tensión medida (V_o) corresponde a la caída de tensión provocada por la corriente que se aplica a la impedancia de interés (Z_x) y el segundo electrodo (Z_{e2}) (Ackmann J., 1984).

Figura 9. Configuración del método a tres electrodos (3EM).



FUENTE: (Celis J. y Jara J., 2007)

1.3.2 El bioimpedanciometro

La bioimpedancia eléctrica es el término que se le da a la impedancia eléctrica medida en tejido biológico. El instrumento para medirla se le conoce como bioimpedanciometro. Este dispositivo excita al tejido con una corriente sinusoidal de frecuencia variable y amplitud constante y mide la respuesta en voltaje del tejido, la cual es previamente amplificada y filtrada. Hay casos en que se utilizan pulsos bifásicos de corriente (Rigaud et al 1996), para obtener el valor de la impedancia eléctrica, sin embargo, el método clásico consiste en excitar con señales sinusoidales (Nebuya S. et al, 1999).

1.3.3 Propiedades eléctricas de los tejidos

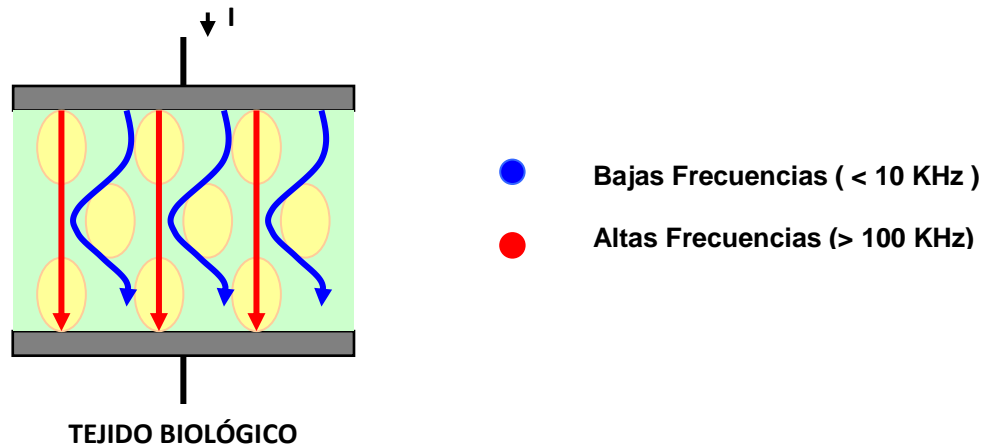
Un tejido biológico puede modelarse como la agrupación de células que están inmersas en un medio iónico extracelular. Así mismo, en el interior de la célula existe también una concentración de iones y fluidos, medio intracelular, donde se realizan los procesos metabólicos de la célula (Brown B. et al. 2005).

Las características eléctricas de los tejidos y la respectiva variación de la permitividad y conductividad eléctrica de los mismos están determinadas por tres efectos diferentes. Primero, las características eléctricas de las células. Segundo, la variación de los volúmenes de los medios intra y extracelular, y por último, se consideran los efectos de doble capa que surgen al tratar con agrupaciones de elementos celulares como es el caso de los tejidos biológicos (Brown B. et al. 2005).

Si se inyecta, a una célula, una señal de corriente de alta frecuencia produce un efecto de cortocircuito en la membrana celular, circulando dicha corriente tanto por el medio intracelular como por el extracelular. Sin embargo, si la frecuencia de la señal de excitación es baja, sólo atraviesa el medio extracelular. Esto produce que el valor de la impedancia eléctrica sea mayor a frecuencias bajas que a frecuencias altas. La Figura 10 muestra la trayectoria

de la corriente tanto para bajas como para altas frecuencias. (Ivorra A. et al. 2001)

Figura 10: Trayectoria de la corriente eléctrica sinusoidal a bajas y altas frecuencias sobre un extendido celular



Fuente: (Celis J. y Jara J., 2007).

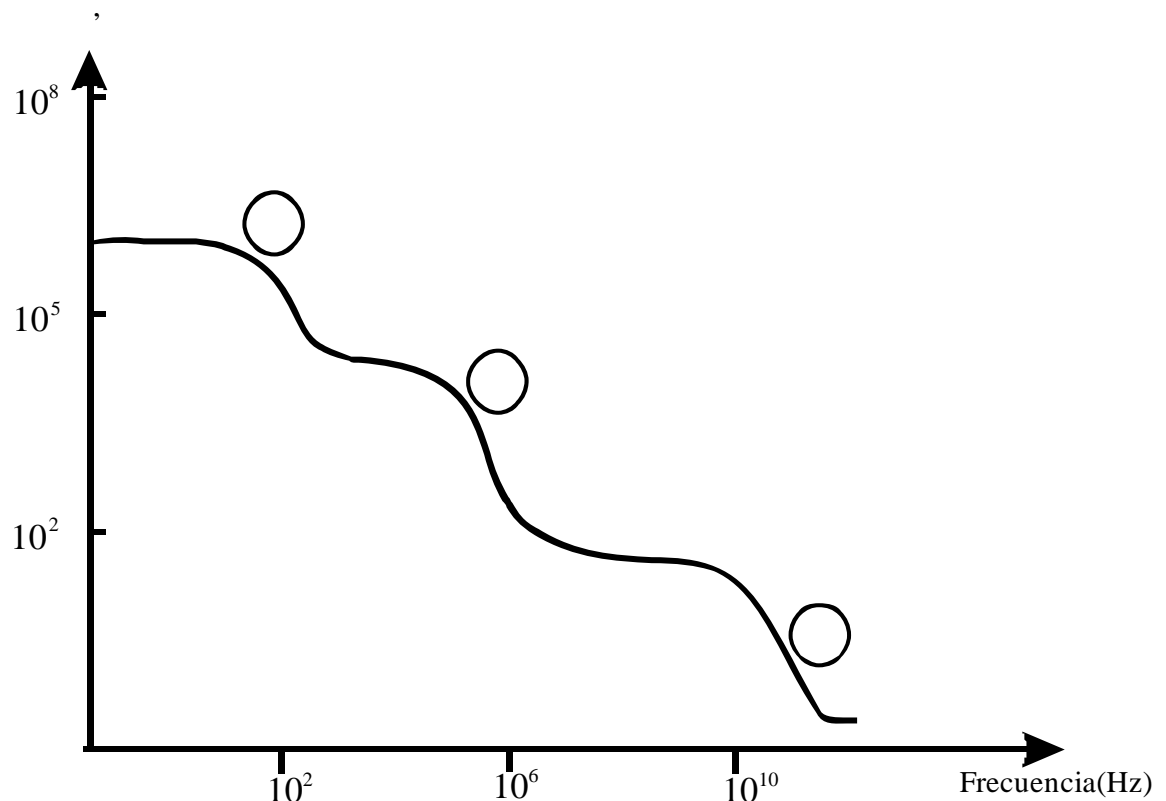
1.3.4 Las zonas de dispersión en los tejidos biológicos

En los tejidos biológicos, se observa una disminución de la permitividad y un aumento de la conductividad eléctrica a medida que se aumenta la frecuencia de la señal de excitación, (Figura 11) lo que se traduce en una disminución de la impedancia al aumentar la frecuencia. Se pueden observar tres zonas de variación de conductividad y de permitividad, que se denominan Zonas de Dispersión, cada una caracterizada por un tiempo de relajación.

La primera zona dispersión, denominada alfa, α , se presenta para frecuencias inferiores a 10KHz (Schwan H., 1957), posee una alta permitividad debida a fenómenos de difusión iónica de los iones que envuelven la membrana celular, en dicha zona la corriente sólo pasa a través del medio extracelular y la célula posee una elevada impedancia comparada con el medio extracelular. La dispersión α está usualmente asociada con las numerosas interfaces

membrana celular – electrolito en el tejido, donde se toman en consideración las cargas acumuladas con la formación de la doble capa electroquímica y la conducción iónica en los límites de la membrana.

Figura 11: Comportamiento de la conductividad y permitividad de los tejidos biológicos.



FUENTE: (Celis J. y Jara J., 2007)

Esta dispersión puede ser considerada como una relajación dipolar que está relacionada con un gran dipolo formado en la membrana celular debido a la acumulación de cargas de polaridades opuestas en cada lado de la membrana bajo el efecto del campo eléctrico aplicado. La dispersión α se manifiesta, por consiguiente, como un fenómeno superficial que no contiene información relacionada con el interior del tejido. Para partículas en suspensión, el valor de la conductividad en la zona α , según Maxwell, está dado por:

$$\sigma = \sigma_a \frac{1 - \rho}{1 + \frac{\rho}{2}} + \sigma_1 \frac{9\rho}{\epsilon + \rho^2}$$

Donde σ_a y σ_i representan las conductividades del medio y de las células en suspensión respectivamente, y p el porcentaje de las células en suspensión. Con esta ecuación se obtienen conductividades típicas de $0,1 \text{ Sm}^{-1}$ en el límite de corriente continua.

La dispersión beta, β , se observa para el rango de radio frecuencia (100kHz hasta 10MHz) (Schwan H., 1957). Esta dispersión es esencialmente debida a mecanismos de carga capacitivos de las membranas celulares. Cuando la frecuencia aumenta, la reactancia capacitiva de la célula disminuye, lo cual induce un incremento en el flujo de corriente que circula a través del medio intracelular, y por consiguiente una disminución en la impedancia eléctrica del tejido. Esta región se caracteriza por contener información sobre la membrana celular y el interior de la célula, ya que la corriente aplicada atraviesa la membrana celular llegando hasta los componentes intracelulares. El valor típico en esta segunda zona de la conductividad es de 1 Sm^{-1} .

En la zona de dispersión β es de destacar la reorientación dipolar de las proteínas y los organelos de la célula, los cuales se comportan en forma semejante a dipolos eléctricos.

La dispersión gamma, γ , predomina en las altas frecuencias del espectro para las cuales las capacitancias de las membranas se comportan como cortocircuitos. La disminución de la permitividad y el aumento de la conductividad a frecuencias altas, como 100MHz; se pueden relacionar con las propiedades polares de las moléculas de agua libres en el tejido (Schwan H., 1957). La dispersión γ es, por consiguiente, principalmente debida a la reorientación de los dipolos eléctricos formados por las moléculas de agua del tejido, las cuales representan cerca del 80% del volumen del tejido blando. Por consiguiente, a altas frecuencias el tejido pierde su especificidad eléctrica, y su comportamiento es similar a un electrolito, desde entonces su permeabilidad e impedancia están dominadas por la relajación del agua libre en el tejido (Schwan H., 1957), (Celis J. y Jara J., 2007).

1.4 ANTECEDENTES Y APLICACIONES DE LA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTRICA

El uso de la Impedancia Eléctrica como herramienta para la caracterización de tejidos biológicos data de principios del siglo XX (Schwan H., 1957), sin embargo, el interés en el estudio de las propiedades eléctricas de los tejidos se remonta a 1786 cuando Galvani mostró experimentalmente el efecto de la electricidad en las funciones motoras de animales. Existen variedades de recopilación de los trabajos realizados en el uso del espectro de impedancia eléctrica en la caracterización de tejido biológico y su uso como herramienta clínica y diagnóstica, 1996 (Rigaud et al 1996). Otros autores reportan el uso del espectro de impedancia eléctrica como medio para el diagnóstico de algunas patologías (Brown B. et al. 2005).

En la Universidad Industrial de Santander el grupo de investigación CIMBIOS ha realizando diferentes tipos de estudios a partir de Espectroscopia de Impedancia Eléctrica e incluso ya se han diseñado dispositivos para tal fin: Medición de Espectro de Impedancia Eléctrica de Tejido Cervicouterino Sano y Displásico in-vitro (Aponte G. y Caro J., 2005), Detección Temprana del Cáncer de Cuello Uterino (Miranda D. et al, 2007), Diseño e Implementación de un medidor de Impedancia para Caracterización no Destructiva de Sólidos Porosos (Bustamante L. y Martínez C., 2006), entre otros⁷.

También a nivel internacional se ha aplicado la espectroscopia de impedancia eléctrica (EIS) para estimar las etapas de maduración de los bananos en circunstancias adecuadas utilizando frecuencias entre 20 Hz. y 1 MHz. (Omoaka P. et al., 1998); para la detección rápida de actividad mutagénica en procariontes en alimentos permitiendo clasificar adecuadamente los mutágenos

⁷ Para mayor información de los trabajos de investigación finalizados en el grupo de investigación CIMBIOS, consultar el sitio web: <http://tux.uis.edu.co/cimbios>

directos analizados: acida sódica, nitrito sódico, metanosulfonato de metilo, 2-nitrofluoreno, 4-nitro-1,2-fenilendiamina, 4-nitroquinoleín-N-óxido, mostrando la misma sensibilidad y una mayor precisión (reflejada en la obtención de menores coeficientes de variación puntual) que el perfectamente validado test de Ames (García L., 2001); también se usa para medir indirectamente la grasa corporal usando 4 electrodos de electrocardiograma, 2 situados en la mano y 2 en el pie. Debido a que los músculos conducen la electricidad y la grasa es un aislador, la impedancia eléctrica medida provee una estimación del agua corporal, lo que se traduce en una estimación de masa corporal magra y grasa corporal y además provee el gasto metabólico de reposo, teniendo en cuenta que cada libra de masa corporal magra quema cerca de 14 calorías por día⁸.

1.5 NUESTRA INVESTIGACION

La CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical)⁹ ha planteado la necesidad de nuevas tecnologías para mejorar la eficiencia en los mecanismos de secado y procesos de postcosecha de la yuca, a través de una optima clasificación de las raíces a partir de su contenido de almidón y materia seca (Ospina J., 2002), (Dominguez C., 1983).

Acudiendo a éste llamado se realizó un estudio exploratorio, en el cual se hizo una búsqueda por Internet de tecnologías que pudiesen ser adaptadas para determinar calidad de la yuca, encontrando muchos trabajos de investigación utilizando Espectroscopia de Impedancia Eléctrica para caracterizar tejidos biológicos, y que el grupo CIMBIOS de la UIS, incluso, había diseñado dispositivos para tal fin y contaba con alianzas con instituciones y otros grupos que trabajan en el mismo campo.

⁸ MORENO, Vicente Martín. GÓMEZ GANDOY, Juan Benito; ANTORANZ GONZÁLEZ, María Jesús. Porcentaje de grasa corporal obtenido por impedancia eléctrica. Centro de Salud Coronel de Palma. Móstoles. Madrid. <http://www.monografias.com/trabajos904/medicion-grasa-corporal/medicion-grasa-corporal2.shtml>

⁹ Centro Internacional de Agricultura Tropical. www.ciat.cgiar.org Últimas visita: 8 de abril del 2008.

Dado que se contaba con la instrumentación electrónica, documentación de los tópicos relacionados con la investigación, experiencia en estudios con espectroscopia de impedancia eléctrica; era factible realizar una investigación de una nueva tecnología (espectroscopia de impedancia eléctrica aplicada a yuca fresca) para medir la calidad de raíces de yuca, encontrar una relación entre el espectro de las raíces de yuca y su porcentaje de contenido de almidón %AL y materia seca %M.S.

Inicialmente se hicieron medidas preliminares de la conductividad de solución acuosa a varias concentraciones de almidón en polvo de yuca, para evaluar si existía alguna relación entre la variación de las concentraciones de almidón en las soluciones y la conductividad de las mismas, obteniéndose alentadores resultados. Luego se obtuvieron los espectros de impedancia eléctrica con el método de dos electrodos para las soluciones a diferente concentración de almidón, con lo después de haber planteado varias hipótesis, diseñado una sonda de medición acorde para la medición en las raíces y elaborado un protocolo de mediciones y almacenamiento de muestras, se procedió a la obtención de los espectros de las raíces para finalmente analizar los resultados y poder encontrar alguna relación numérica entre la concentración de almidón en las soluciones, el %AL en las raíces y su respectivos espectros de Impedancia eléctrica.

2. MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD DE UNA SOLUCIÓN ACUOSA DE ALMIDÓN AGRIO DE YUCA EN POLVO A DIFERENTES CONCENTRACIONES.

2.1 Planteamiento y diseño del experimento

Como se anotó en la fundamentación teórica, existe una relación directa entre el contenido de almidón (%AL) y el contenido de materia seca (%M.S), es decir, que al obtener cualquiera de las dos, con una simple relación matemática se puede obtener la otra, por eso de ahora en adelante cuando se habló de %AL se habla implícitamente también de %M.S.

Para evaluar la viabilidad de la espectroscopia de impedancia eléctrica como método de medición del %AL en las raíces de yuca, debe probarse primero si hay una relación entre su comportamiento eléctrico y su contenido de almidón. Para esto debe anotarse que la pulpa de la raíz de la yuca está conformada aproximadamente por agua en un 60%, por almidón en un 35%, por fibra en un 1%, por grasas en un 0,5%, cenizas o minerales 2%, y proteínas alrededor de 1.5%. Por lo que se debe estimar qué tanta incidencia tiene la variación del contenido de almidón en el comportamiento eléctrico de las raíces y que tan predominante es esa incidencia en comparación con la variación de los demás componentes de la raíz.

Buscando entonces medir la incidencia de la variación del contenido de almidón en el comportamiento eléctrico de la yuca y conociendo que el tratamiento del almidón agrio de yuca, que se utiliza en panadería, tiene un tratamiento industrial simple, 100% natural y sin compuestos químicos, se hacen mediciones preliminares de la conductividad eléctrica a soluciones acuosas a diferentes concentraciones de almidón agrio de yuca en polvo, simulando con esto entonces los cambios de %AL en las raíces de yuca (Ospina J., 2002).

Luego de sacar conclusiones e hipótesis de las conductividad obtenidas en las mediciones preliminares, se procede a obtener los espectros de impedancia eléctrica de las mismas soluciones, evaluando previamente el grado de pureza del almidón de yuca en un laboratorio químico de alimentos y se hacen medidas también con almidón analítico que se utiliza para análisis químico de alimentos. Finalmente se analizan los resultados obtenidos, se sacan conclusiones e hipótesis para las medidas en las raíces de yuca.

Para los experimentos se utilizan los siguientes elementos:

- Almidón agrio de yuca en polvo, utilizado en panadería con una concentración de 85.31%; almidón analítico en polvo CarloErba con una concentración de 86.28%¹⁰ y recipientes plásticos para almacenar las diferentes cantidades.

Figura 12. Recipientes plásticos con diferentes cantidades de almidón de yuca en polvo y almidón analítico en polvo CarloErba.



FUENTE: Autor del proyecto

- Agua destilada y desmineralizada.

¹⁰ Resultados de análisis espectrofotométrico No. 080540 y No. 080541 del 16 de febrero del 2008. Laboratorios de servicios para la Industria de Alimentos y el Medio Ambiente SIAMA. Web site: www.siamaltda.com, E-mail: info@siamaltda.com.

Figura 13. Botellas de agua destilada y desmineralizada marca Quibi.



FUENTE: Autor del proyecto.

- Un tamizador de 46 μm . Debido a la baja solubilidad del almidón en agua, es necesario filtrar los gránulos grandes que por lo general son fibras y dejar solo los de 46 μm o menos.
- Un medidor de conductividad que hace uso de una celda de medición de conductancia calculable diseñado como tesis de grado por los miembros del Grupo CIMBIOS Samuel Alberto Jaimes Morales y Juan Pablo Valencia Quintero.

Figura 14. Medidor de Conductividad y celda de medición de conductancia calculable, con un volumen de 117.81 ml.

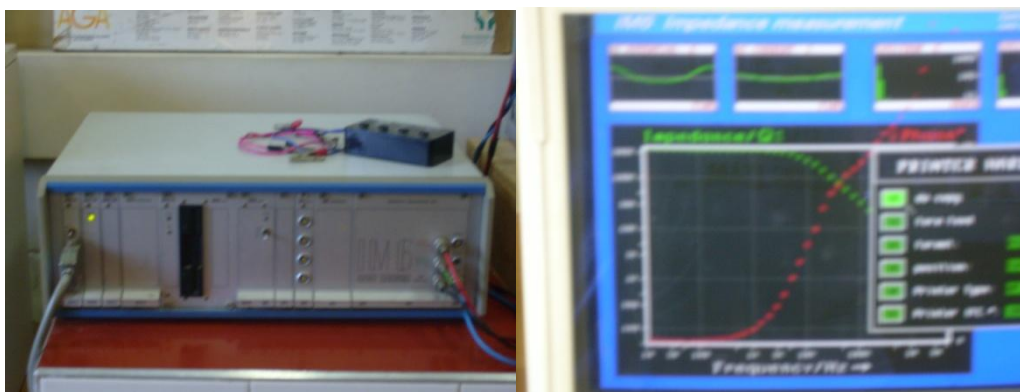


FUENTE: Autor del Proyecto

- Analizador de Impedancia Eléctrica BAS-Zahner IM6: Es un medidor de impedancia eléctrica poderoso y de alta precisión, con un software de usuario bastante amigable llamado Thales que simplifica la adquisición de datos, con

presentaciones de gráficas en 2D y 3D de alta calidad, y datos de impedancia fiables con un barrido de frecuencia desde el orden de los mHz hasta 8MHz. El software es un sistema modular, con un programa separado para la adquisición de datos y otro para el análisis de los datos, como también programas con técnicas para la voltimetría cíclica, polarización lineal, adquisición y análisis de pruebas electroquímicas. (Bott A., 1998).

Figura 15. Analizador de Impedancia BAS-Zahner IM6 y software de análisis y adquisición de datos Thales, propiedad de la Corporación de la Investigación de la Corrosión (CIC).



Fuente: Autor del Proyecto

Figura 16. Agitador de vidrio y vaso graduado de 120 ml, utilizados para preparar las soluciones acuosas de almidón en polvo de yuca.

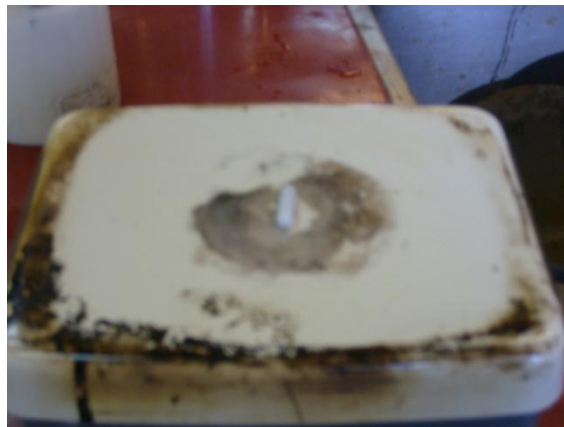


FUENTE: Autor del Proyecto

- Agitador de vidrio para disolver el almidón en los vasos graduados.

- Balanza electrónica de alta precisión, propiedad de la Corporación de la Investigación de la Corrosión.
- Vasos graduados de 10ml, 120ml y 250 ml.
- Agitador magnético. Consiste en una bobina que genera un campo magnético que a su vez hace girar un imán en forma de capsula recubierta por un plástico inerte, que una vez introducido en la celda de medición contrarresta la rápida precipitación del almidón, obteniendo una solución lo aproximadamente homogénea dentro de la celda.

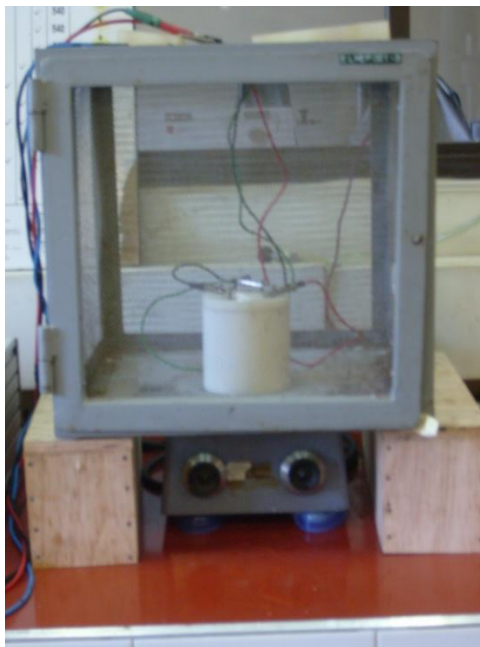
Figura 17. Agitador Magnético. Plataforma donde se coloca el recipiente donde se prepara la solución y capsula que gira dentro del recipiente, para mantener su homogeneidad.



Fuente: Autor del Proyecto

- Jaula de Faraday, conectada a tierra que permite que el campo eléctrico total sea nulo dentro de ella, evitando que cualquier tipo de interferencia electromagnética altere las mediciones. (Bustamante L. y Martinez C.,2007).
- Bancos de madera para alzar la jaula de Faraday, de tal manera que el agitador magnético quede por fuera, con el fin de evitar que el campo eléctrico altere las mediciones y que sólo penetre el campo magnético que hace girar la cápsula dentro de la celda de medición.

Figura 18. Jaula de Faraday Propiedad de la Corporación de la Investigación de la Corrosión (CIC). Montaje final del experimento para pruebas preliminares con almidón diluido en agua desmineralizada.



FUENTE: Autor del Proyecto

2.2 Pruebas preliminares

Como pruebas preliminares se mide la conductividad de soluciones acuosas a diferentes concentraciones de almidón en polvo de yuca. Se inicia entonces tamizando el almidón de yuca, se pesan las diferentes muestras de almidón en la balanza electrónica, estableciendo un paso inicial de 0.1 gr entre ellas, luego de 0.2 gr y terminando con altas concentraciones. Después se procede a preparar en un vaso graduado la primera solución, vertiendo 0.6 gr de almidón en 120 ml de agua desmineralizada. Se introduce la solución preparada en la celda de medición, se ingresa la celda en la Jaula de Faraday, se conectan los electrodos y se procede a hacer la medición con el conductivímetro. Finalizada la medición se vacía la celda, se lava varias veces con agua desmineralizada para garantizar que queden la menor cantidad de partículas en ella, que puedan contaminar próximas mediciones. Después de esto se hace los pasos anteriores para cada una de las demás concentraciones.

Las medidas de conductividad arrojadas se tabulan en la tabla 3, notándose como aumenta la conductividad a medida que aumenta las concentraciones de almidón en las soluciones.

Tabla 3. Soluciones acuosas a diferentes concentraciones de almidón¹¹ de yuca, con sus respectivos valores de conductividad.

Concentración [gr/Lts]	Conductividad [S/m]	Concentración [gr/Lts]	Conductividad [S/m]
5	7101.19	17.5	10808.3727
5.833	7123.1	18.33	11126.9273
6.667	7414.27	19.167	11530.9091
7.5	7761.54545	20	11934.5455
8.333	8035.98182	20.833	12290.9091
9.1667	8339.25455	22.5	12868
10	8622.71818	24.167	13395.0909
10.833	9009.93636	25.833	13839.5455
11.667	9210.48182	27.5	14258.6364
12.5	9425.75455	29.167	14701.5455
13.333	9535.64378	45.833	16388
14.167	9794.37273	83.333	21701.8182
15	9954.21818	166.67	32341.8182
15.833	10236.3663	333.33	49021.4545

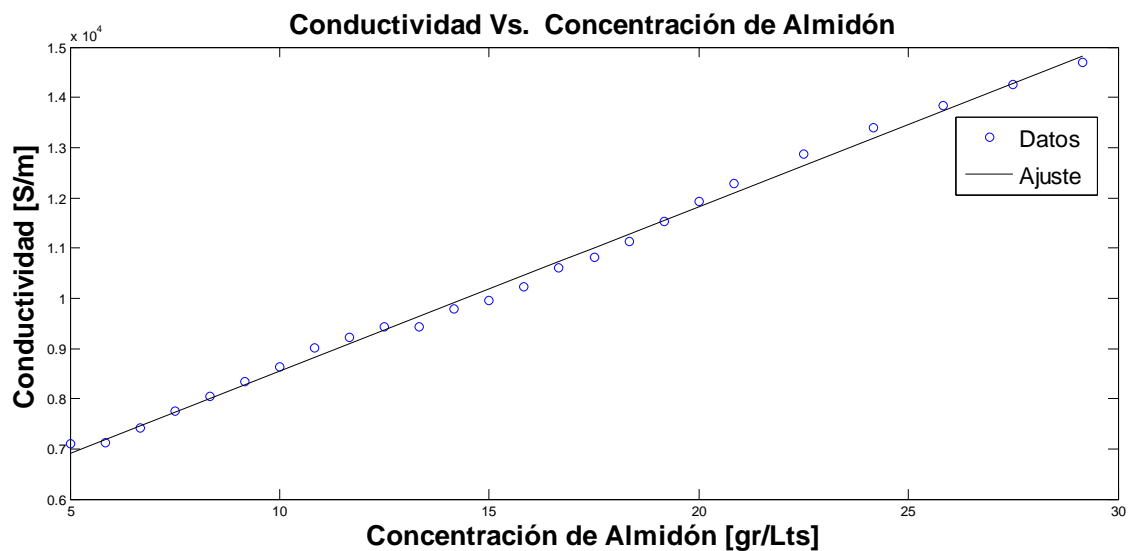
FUENTE: Autor del Proyecto

A continuación, en la figura 19 se muestra la proporcionalidad directa existente entre la conductividad de las soluciones y las concentraciones de almidón de yuca de panadería, en el rango donde las concentraciones varían a dos pasos constante, existiendo un coeficiente de correlación de 0.9972 (usando el

¹¹ Los valores de concentraciones se obtienen de la expresión $\text{Conc} = \frac{\text{peso [gr]}}{\text{Volumen [Lts]}}$, donde el peso corresponde al de la muestra de almidón y el volumen a la cantidad de agua en la que se disuelve, que en éste caso se mantiene constante en 0.12 Lts (120 ml) que es el volumen aproximado de la celda de medición. Ver Resultados de Análisis de Espectrofotometría (Anexo C)

comando *corrcoef* de Matlab v.7), una pendiente de 327.36 y una constante aditiva de 5278.4 (usando el comando *polyfit* de Matlab v.7) al aplicar regresión lineal (de la forma $y = m \cdot x + b$) a los datos.

Figura 19. Conductividad Vs. Concentración de almidón. Coeficiente de correlación de 0.9972, una pendiente de 327.36 y constante aditiva de 5278.4.

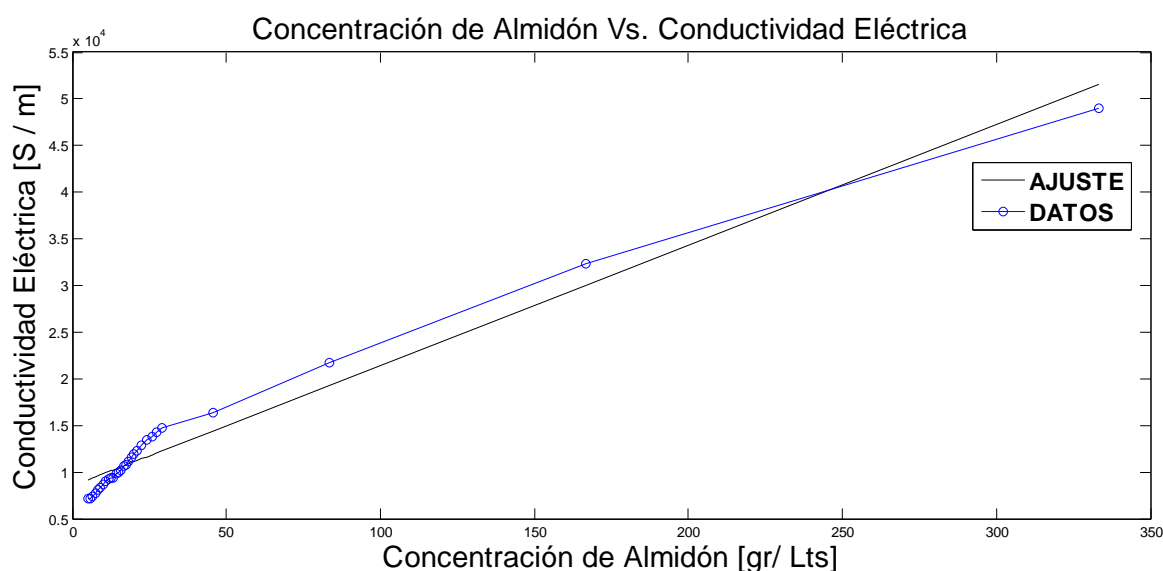


FUENTE: Autor del proyecto

Si ahora se continúa aumentando el paso del cambio de las concentraciones de almidón, se encuentra que a medida que se incrementan las concentraciones, el valor de la pendiente disminuye mostrando tendencia a un estado de saturación (Ver figura 20).

Finalmente de los resultados de las pruebas preliminares se concluye que existen diferentes valores de pendientes en la relación entre conductividad y concentración de almidón, dividiendo así la proporcionalidad existente entre diferentes rangos de valores de concentración.

Figura 20. Conductividad Vs Concentración. El valor de la pendiente es 129.08 y de la constante aditiva es 8518.3 para una constante aditiva de la forma $y=m*x + b$, donde m y b son constantes reales. El coeficiente de correlación es de 0.98332.



FUENTE: Autor del Proyecto

2.3 PROTOCOLO DE MEDICIONES

Con los resultados obtenidos con las pruebas preliminares se diseña el protocolo de mediciones para la obtención de los espectros de impedancia eléctrica con el método de dos electrodos de las soluciones de almidón analítico y de panadería, que consiste prácticamente en lo mismo que para las pruebas preliminares, pero con la diferencia de que ahora se mide impedancia eléctrica con el analizador de espectros BAS-ZAHNER IM6, y además de usar almidón agrio de yuca (al 85.31% de pureza), se utiliza también almidón analítico CarloErba (86.28% de pureza) que a diferencia que el de yuca no contiene cianuro, ceniza ni calcio que pudiesen estar incidiendo en la variación de la conductividad de las soluciones. Otro paso que se anexa es la calibración previa de la celda de medición con respecto a un dispositivo patrón.

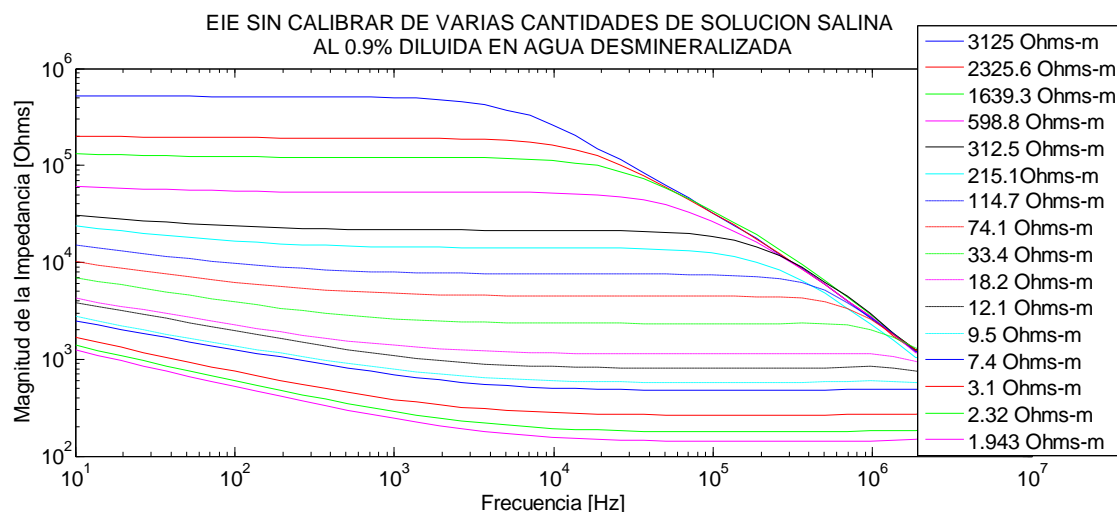
2.3.1 Calibración de la celda de medición

Para la calibración de la celda se suele utilizar solución salina (NaCl) al 0.9%, polvo de PVC (Polyvinyl Vinychon Chloride), polvo de aluminio, TX-150 o superstuff (material compuesto de acrilamida y de NN'-metileno bis-acrimalida, para una solución de gel del 7%). Por su fácil acceso y manipulación, además de no ser tóxico se opta por hacer la caracterización de la celda con solución salina (NaCl) al 0.9%.

El procedimiento consiste en obtener el espectro de impedancia eléctrica de varias muestras de solución salina diluida en agua desmineralizada de conductividad eléctrica conocida, que se ha medido en un dispositivo patrón, que en nuestro caso es el medidor de conductividad del laboratorio de pruebas industriales de la UIS, para luego obtener el factor de forma de la expresión de impedancia eléctrica. En la tabla 4 se muestran las concentraciones de solución salina al 0.9% diluidas en agua desmineralizada que se tomaron como patrón y sus respectivos valores de conductividad y resistividad.

En la figura 21 se muestra el espectro de cada una de las soluciones a diferentes concentraciones de solución salina, y como puede verse, la magnitud de los espectros son menores cada vez que aumenta la cantidad de solución salina disuelta. También se nota una dispersión a baja frecuencia que seguramente se debe al comportamiento capacitivo de la interface electrodo – electrolito (que es muy notoria en mediciones bipolares como es en este caso), y otra dispersión a alta frecuencia que seguramente se debe a un comportamiento no lineal del IM6 para barridos en rangos tan grandes como el que se estableció para la realización de las medidas de los espectros de impedancia eléctrica. Es objetivo entonces del proceso de calibración contrarrestar el efecto que la interface electrodo electrolito y la no linealidad del equipo haga sobre los resultados obtenidos.

Figura 21. Espectro de impedancia eléctrica sin calibrar para las diferentes cantidades de solución salina (NaCl) al 0.9% diluida en agua desmineralizada.



FUENTE: Autor del proyecto

Tabla 4. Cantidad de solución salina (NaCl) al 0.9% diluido en agua desmineralizada, con sus respectivos valores de conductividad y resistividad eléctrica.

Cantidad de solución salina disuelta [ml NaCl/ 120 ml H ₂ O]	Conductividad uS/m	Resistividad en ohm-m
0.0	320	3125
0.02	430	2325.5814
0.04	610	1639.34426
0.1	1670	598.802395
0.20	3200	312.5
0.30	4650	215.053763
0.6	8720	114.678899
1	13500	74.0740741

2	29900	33.4448161
4	55000	18.1818182
6	83000	12.0481928
8	105000	9.52380952
10l	136000	7.35294118
20l	319040	3.13440321
30	431760	2.31610154
40	514580	1.94333243

FUENTE: Autor del proyecto.

Como se vio en la fundamentación teórica la impedancia eléctrica está dada por

$$Z = k \frac{1}{\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r} = k \frac{1}{\sigma^*} = k\rho^* = k(r + jx) = k |\rho^*|_{\text{fase}(\rho^*)}$$

k = Factor de Celda (m¹)

σ = Conductividad eléctrica (S/m)

j = Símbolo imaginario

ω = Frecuencia

ε₀ = Permitividad del vacío.

ε_r = Permitividad relativa.

El factor de celda (ó forma) “k” depende de la geometría de los electrodos de medida y, en menor grado de la geometría de la muestra. Para calcular el factor de forma “k” en éste experimento se recurre a un método alternativo y práctico, que es a través de regresiones lineales en cada una de las frecuencias de

excitación, tomando los valores de conductividad conocidos y tabulados en la tabla 4. Para la regresión lineal aplicada a cada una de las frecuencias los espectros se utilizaron mínimos cuadrados a través del comando “polyfit(x,y,n)” escogiendo $n = 1$ como grado del polinomio, y como el valor de resistividad (inverso de la conductividad medida con el dispositivo patrón), y x como la impedancia medida con el IM6.

Como la impedancia es compleja es de esperarse que los valores de la constante multiplicativa y aditiva que arroja el comando “polyfit” seon también complejos. Cabe anotar que esta caracterización obliga a que la parte imaginaria de la impedancia calibrada (impeditividad por sus unidades en Ohm-m) sea aproximadamente cero. A continuación en la tabla 5 se muestra los valores de las constantes multiplicativas “m” y de las constantes aditivas “b” para cada una de las frecuencias de excitación.

Tabla 5. Valores de las constantes multiplicativas y aditivas.

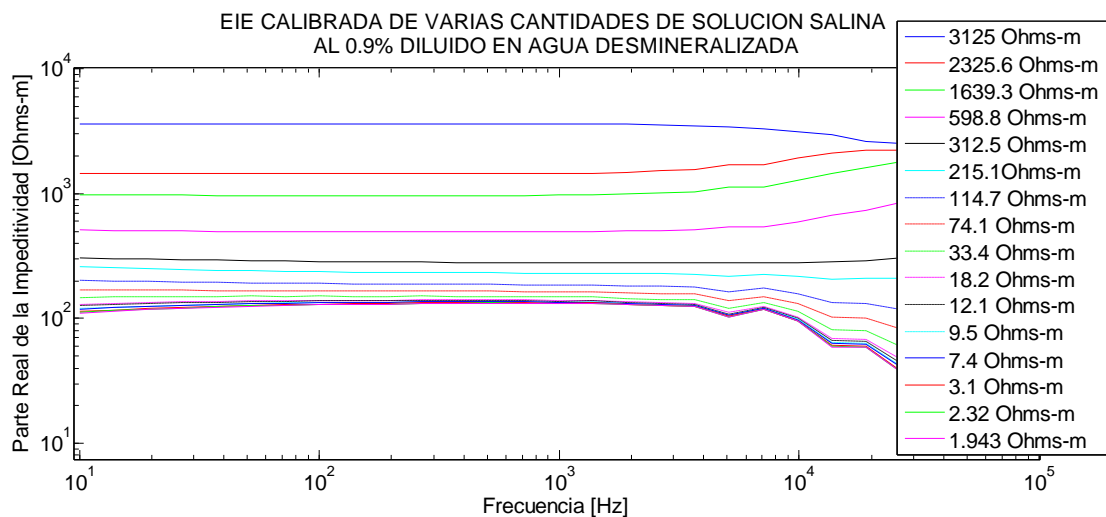
Frecuencia [Hz]	Constante multiplicativa “m” [m]	Constante aditiva “b” *10e3 [Ohms-m]
5000000	-1.0465 + 0.6033i	3.2041 - 5.3963i
3602200	-0.6934 + 0.6862i	2.0785 - 4.7821i
2595100	-0.4721 + 0.6103i	1.4941 - 4.4557i
1869600	-0.5122 + 0.6357i	1.2964 - 4.9102i
1346900	-0.3706 + 0.4530i	1.2577 - 4.6618i
970370	-0.1844 + 0.3453i	0.7362 - 3.6934i
699090	-0.1196 + 0.2589i	0.5958 - 3.4740i
503640	-0.0774 + 0.1975i	0.5145 - 3.3925i
362840	-0.0421 + 0.1522i	0.3326 - 3.1723i
261400	-0.0228 + 0.1188i	0.2856 - 3.0180i

188320	-0.0067 + 0.0926i	0.1670 - 2.8141i
135670	0.0025 + 0.0732i	0.1071 - 2.6237i
97744	0.0066 + 0.0570i	0.0682 - 2.3401i
70418	0.0078 + 0.0444i	0.1258 - 2.1143i
50731	0.0094 + 0.0340i	0.1603 - 1.8522i
36549	0.0095 + 0.0262i	0.2647 - 1.6436i
26331	0.0097 + 0.0200i	0.3563 - 1.4265i
18970	0.0093 + 0.0151i	0.5683 - 1.2510i
13666	0.0097 + 0.0109i	0.5761 - 0.9667i
9846	0.0082 + 0.0086i	0.9325 - 0.8702i
7093	0.0074 + 0.0065i	1.1600 - 0.7049i
5110	0.0080 + 0.0045i	1.0150 - 0.4868i
3682	0.0072 + 0.0035i	1.2319 - 0.3895i
2652	0.0071 + 0.0026i	1.2473 - 0.2941i
1911	0.0070 + 0.0018i	1.2705 - 0.1986i
1377	0.0069 + 0.0014i	1.3064 - 0.1452i
992	0.0069 + 0.0010i	1.2983 - 0.0960i
714	0.0069 + 0.0007i	1.3070 - 0.0530i
515	0.0068 + 0.0005i	1.3085 - 0.0242i
371	0.0068 + 0.0004i	1.3019 + 0.0001i
267	0.0068 + 0.0003i	1.2975 + 0.0226i
192	0.0069 + 0.0003i	1.2753 + 0.0400i
139	0.0068 + 0.0002i	1.2686 + 0.0589i
100	0.0068 + 0.0002i	1.2579 + 0.0786i
72	0.0068 + 0.0001i	1.2359 + 0.0951i

52	$0.0068 + 0.0001i$	$1.2191 + 0.1117i$
37	$0.0068 + 0.0001i$	$1.1890 + 0.1304i$
27	$0.0068 + 0.0001i$	$1.1571 + 0.1460i$
19	$0.0068 + 0.0002i$	$1.1212 + 0.1650i$
14	$0.0067 + 0.0002i$	$1.0843 + 0.1853i$
10	$0.0067 + 0.0002i$	$1.0403 + 0.2042i$

FUENTE: Autor del Proyecto.

Figura 22. Espectro de impedancia eléctrica calibrada aplicando regresión lineal a cada una de sus frecuencias de excitación.

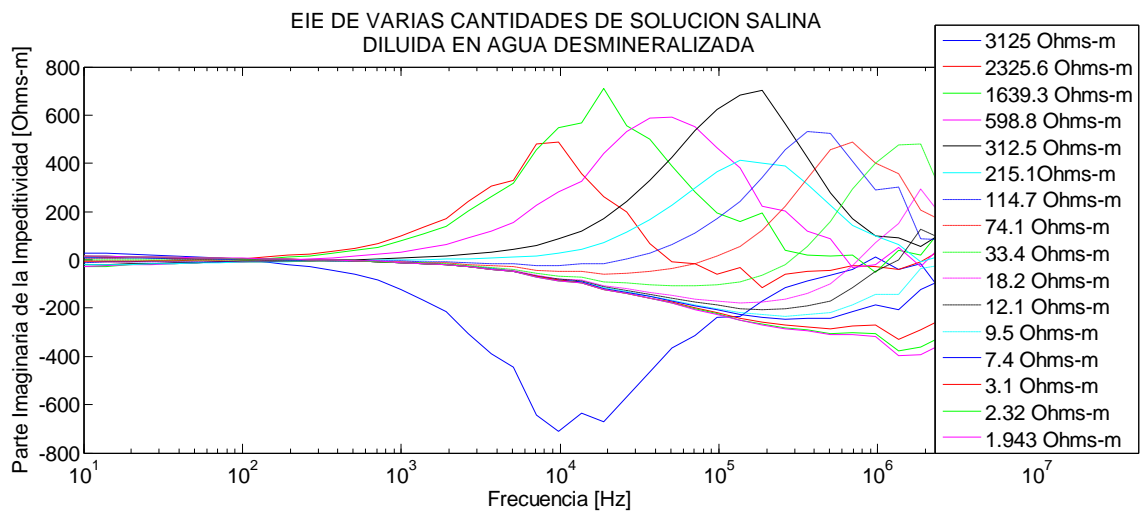


FUENTE: Autor del Proyecto.

Como se puede ver en la figura 22 la dispersión existente a bajas frecuencias se logró eliminar luego de la calibración, sin embargo las dispersiones a altas frecuencias no han desaparecido, al parecer la no linealidad del equipo provoca que al calibrarse los datos la parte imaginaria de la impedancia (Impedancia calibrada) sea considerablemente grande y positiva desde 10 kHz en adelante, lo cual no coincide con el planteamiento teórico del modelo de un dieléctrico con pérdidas, ya que este establece que deben tener su parte imaginaria negativa (ver figura 23).

Buscando resolver el problema se intenta calibrar aplicando regresión lineal con algoritmos genéticos de Matlab v7, condicionando a que las constantes de la regresión lineal obliguen que la parte imaginaria sea cero y la parte real positiva. Con ellos se obtiene un ajuste óptimo pero las curvas resultan no ser suaves como se puede ver en la figura 24.

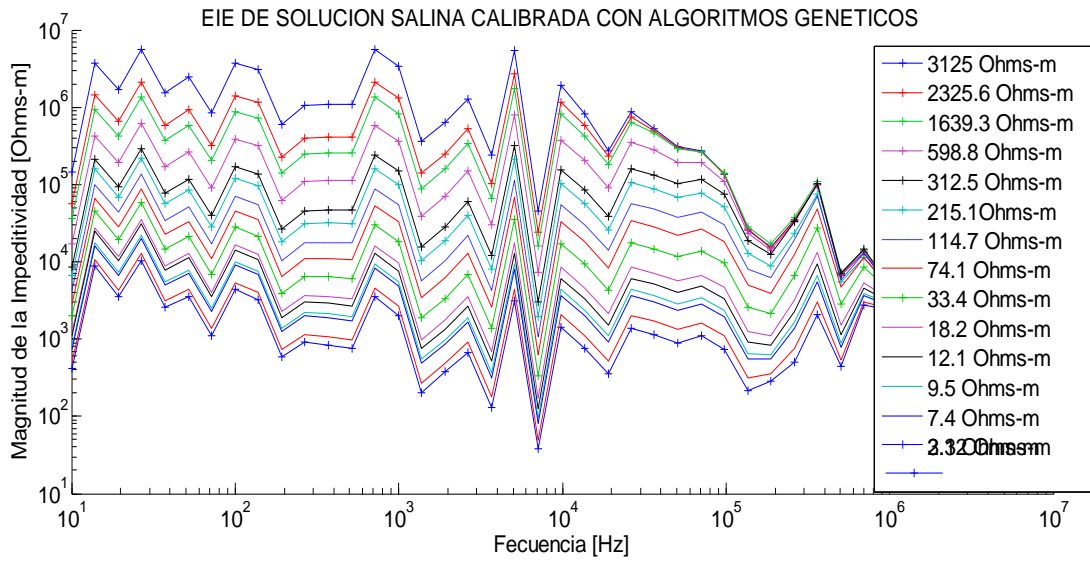
Figura 23. Parte Imaginaria del espectro de impedancia eléctrica calibrado, para varias cantidades de solución salina diluida en agua desmineralizada.



FUENTE: Autor del proyecto.

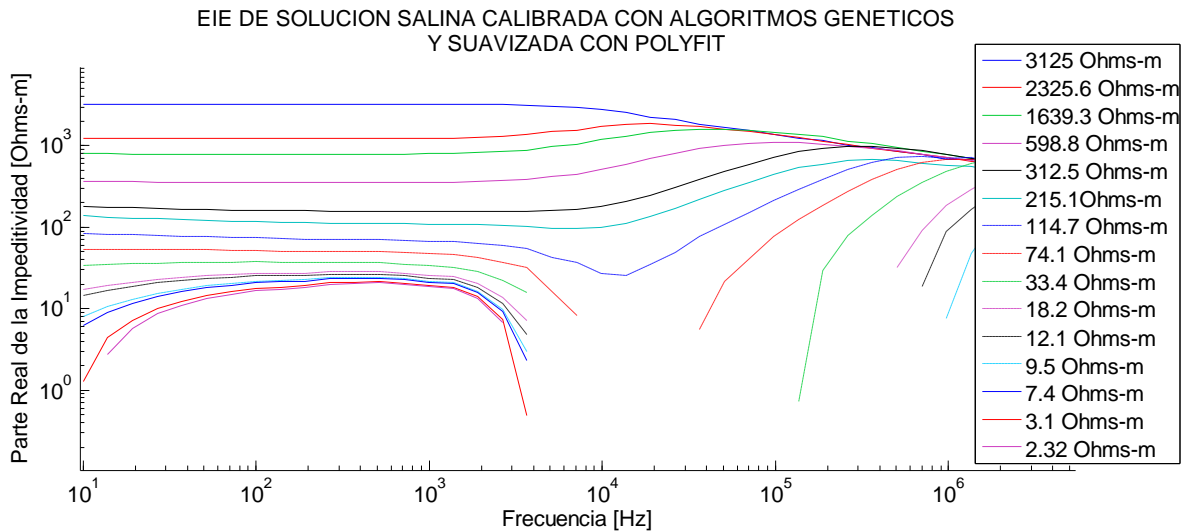
Intentando aprovechar el excelente ajuste de los algoritmos genéticos se intento suavizar las curvas pasando los datos calibrados por la rutina anterior de Matlab con la que se ajusto la parte real e imaginaria, lográndose que se suavizaran buena parte de las curvas sin embargo estas presentaban varias dispersiones que pueden generar conflictos al momento de analizar los datos (Ver Figura 25).

Figura 24. Espectro de Impedancia Eléctrica (EIE) para varias cantidades de solución salina al 0.9%, calibrada con algoritmos genéticos.



FUENTE: Autor del proyecto

Figura 25. EIE de varias concentraciones de solución salina al 0.9%, calibrada con algoritmos genéticos y luego suavizada con el comando polyfit de Matlab.



FUENTE: Autor del proyecto

Sin embargo aunque se logra una buena calibración, se obtienen valores negativos para la parte real de impedancia lo cual es incongruente. Sería

interesante indagar sobre la mejor manera para superar el inconveniente de la no linealidad del montaje de medición a altas frecuencias, pero no es objetivo de éste proyecto, así que para el análisis de estos datos se decide usar la calibración inicial utilizando constantes multiplicativas y aditivas complejas obtenidas con el comando “polifyt” de Matlab v7. y limitando el rango de frecuencias entre 10 Hz y 10Khz para evitar las alteraciones ocasionadas por la no linealidad del montaje.

2.3.2 Especificaciones del protocolo de mediciones

Para cada medición se registra la fecha, la hora y se guardan los archivos arrojados por el IM6 de tal manera que sean fáciles de identificar al momento del análisis. Los primeros datos son arrojados por el mismo impedanciometro y las mediciones se guardan con nombres de acuerdo a la fecha y al tipo de almidón, se enumeran de manera ascendente, y comentando la concentración, así por ejemplo un documento que se llame *apf722*, corresponde a la concentración 22 (22.5 gr/Lts) de almidón de panadería, realizada el 7 de febrero del 2008 y otro que se llame *apu1304* corresponde a una medida realizada el 13 de febrero del 2008 a la concentración 4 (6.667 gr/Lts) de almidón analítico soluble CarloErba.

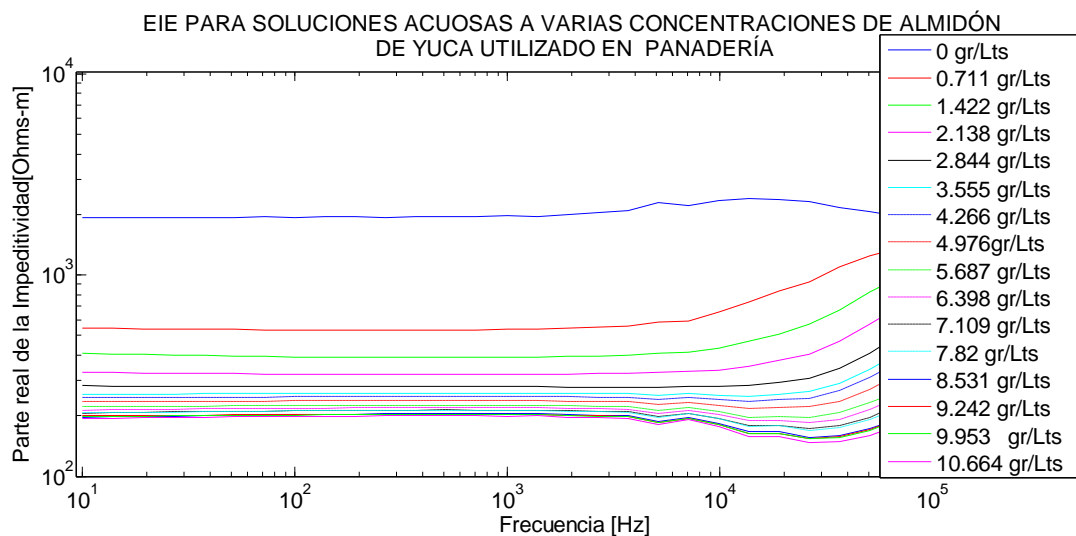
Siguiendo las recomendaciones del personal del laboratorio de electroquímica de la CIC, cada vez que se vaya a utilizar el analizador de espectros IM6 debe esperarse 15 minutos luego de encender mientras el equipo estabiliza su temperatura, luego se hacen mediciones de prueba con una celda patrón, si hay algún desfase se procede a calibrarlo a través del software de manejo. Para iniciar la adquisición de datos debe seleccionarse el rango para el barrido de frecuencias y el número de muestras por cada década. Para éste caso se hace un barrido desde 10 Hz hasta 5MHz, tomando 7 muestras por cada década, y también por recomendaciones del personal del laboratorio de electroquímica de la CIC, el barrido siempre se inicia desde 5MHz.

Finalmente los resultados arrojados por el IM6 se organizan en un documento de Excel para su posterior análisis en Matlab.

2.4 RESULTADOS

Los datos de las mediciones de impedancia realizadas con almidón de panadería y almidón analítico CarloErba son calibrados, y luego se transforman para trabajar con conductividad compleja (parte real) para poder hacer luego las comparaciones con las pruebas preliminares. A continuación en la figura 26 se muestra el espectro de impedancia eléctrica del almidón de panadería diluido en agua desmineralizada, notándose como disminuye la magnitud de la impedancia (aumenta la conductividad compleja) cuando incrementa la concentración de almidón en las soluciones acuosas.

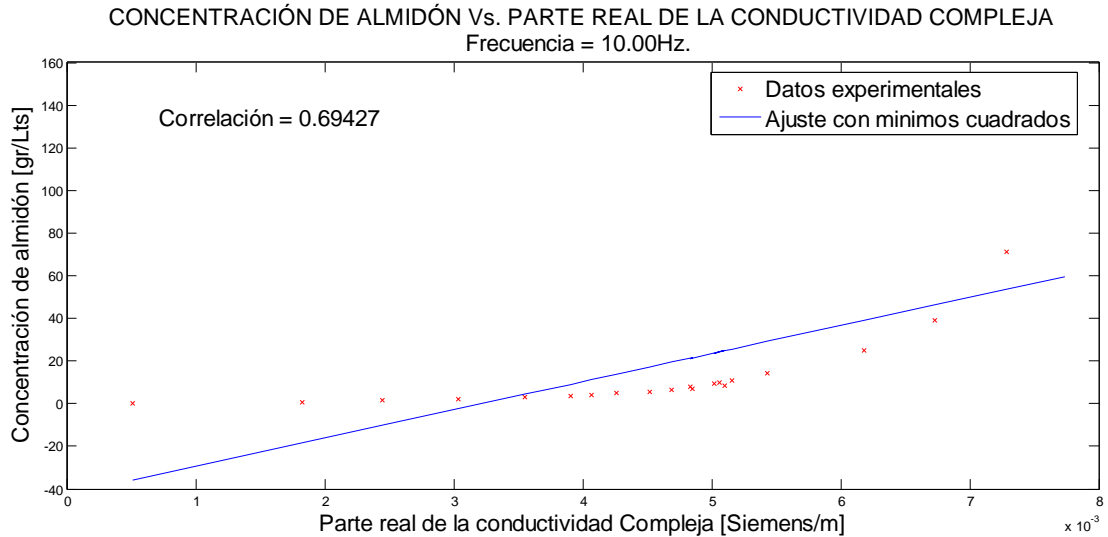
Figura 26. Espectro de Impedancia Eléctrica de soluciones acuosas a diferentes concentraciones¹² de almidón de yuca utilizado en panadería.



Ahora para hacer la comparación con las medidas de las pruebas preliminares se trabaja con la parte real del inverso de la impeditividad, conocida como la conductividad compleja y se analizan los valores del coeficiente de correlación para un valor fijo de frecuencia como se puede ver en las figura 27.

¹² Para la obtención de las concentraciones se debe tener en cuenta el grado de pureza del almidón de yuca utilizado en panadería (85.31%) quedando así la expresión de las concentraciones. Concentración= 0.8531*peso[gr]/0.12Lts. Ver resultados de los análisis Espectrofotométricos (Anexo C)

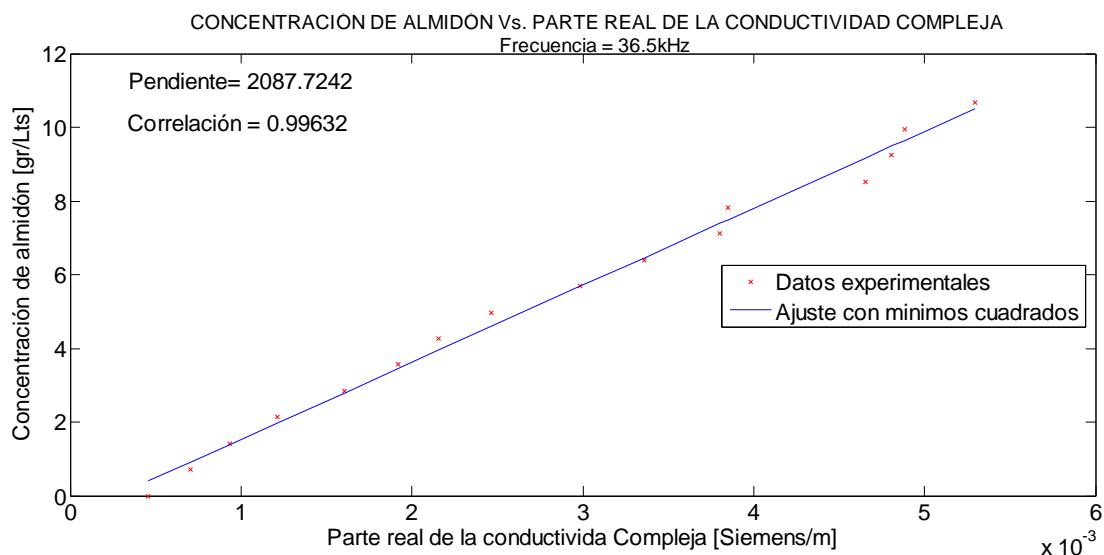
Figura 27. Concentración de almidón Vs. Parte real de la Conductividad Compleja a una frecuencia de excitación de 10 Hz.



En la figura 27 se aprecia que los datos no forman una línea recta y se obtiene mediano valor de correlación lo que indica que no existe una buena proporcionalidad entre la parte real de la conductividad compleja y las concentraciones lo que contradice lo que se estaba esperando. Sin embargo debe recordarse que en las pruebas preliminares se había notado cambios de pendiente a medida que aumentaban las concentraciones de almidón, con lo que se concluyó que la proporcionalidad directa existe pero en rangos de concentraciones, así que si tomamos valores de concentraciones aproximados a los medidos con el conductivímetro en las pruebas preliminares, se obtiene una notable mejora en el coeficiente de correlación, como se puede ver en la figura 28.

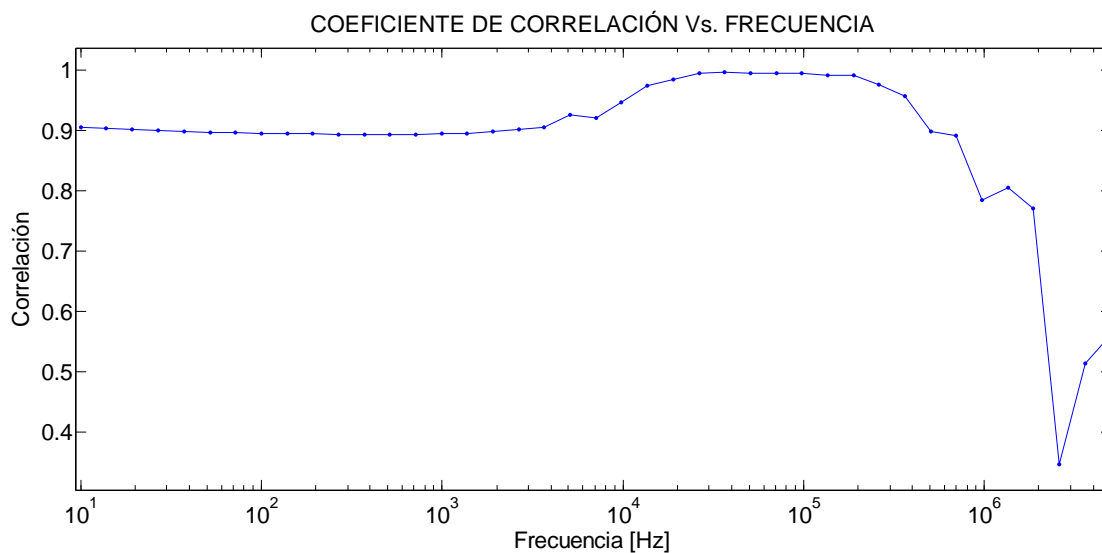
El valor de correlación que se presenta en la figura 28 es el más aproximado al obtenido en las pruebas preliminares, sin embargo el valor de la pendiente es bastante diferente (para las pruebas preliminares se había obtenido uno de 327.36 y ahora se obtuvo una pendiente de 2087.7242). Para hacer una mejor idea en las figuras 29 y 30 se muestran cómo varían los valores de correlación y pendiente para cada una de las frecuencias de excitación analizadas.

Figura 28. Concentración de almidón Vs. Parte real de la Conductividad Compleja a una frecuencia de excitación de 36.5 kHz. Tomando el mismo rango de concentraciones de almidón de yuca con las que hicieron los análisis en las pruebas preliminares.



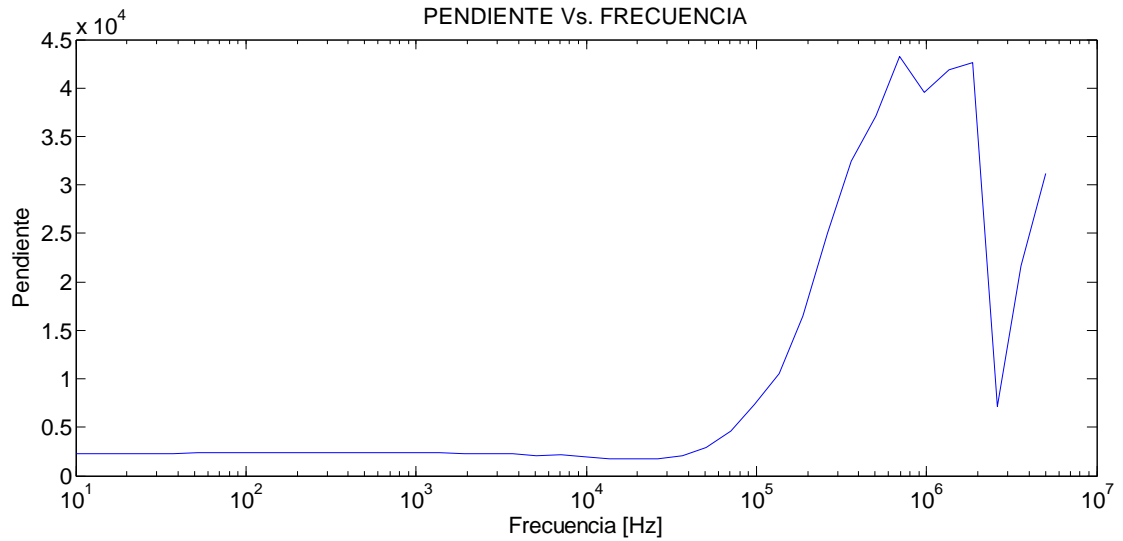
FUENTE: Autor del Proyecto

Figura 29. Comportamiento del coeficiente de correlación con respecto a los valores de frecuencia de excitación.



FUENTE: Autor del Proyecto.

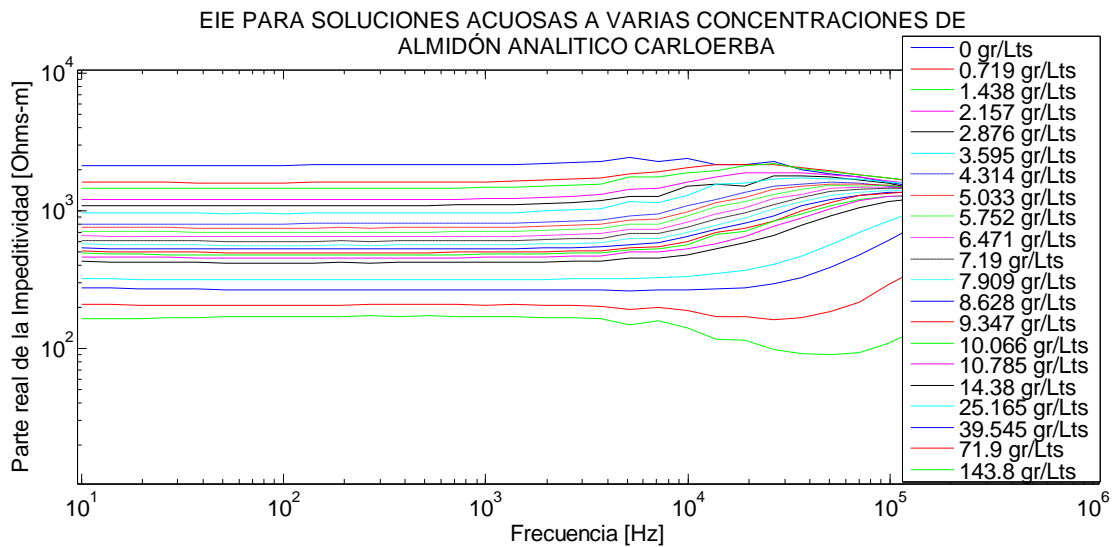
Figura 30. Comportamiento de los valores de pendientes con respecto a la frecuencia de excitación.



FUENTE: Autor del proyecto

Como se acaba de mostrar, la correlación permanece constante hasta aproximadamente 10Khz, aumenta irónicamente en el rango de frecuencias donde el equipo de medición mostró no linealidad antes de la calibración, y finalmente cae precipitosamente para frecuencias cercanas a 1 MHz. Por su parte la pendiente oscila en valores aproximados a 2000 hasta 40kHz aproximadamente, a partir de ahí aumenta precipitosamente y cae de la misma manera a frecuencias superiores. De tal modo aunque tenemos un valor de correlación prácticamente igual que el de las pruebas preliminares, y en la frecuencia de excitación del conductivímetro se obtiene también una proporcionalidad directa entre la concentración y la conductividad compleja, los valores de las pendientes son diferentes en un orden aproximadamente, esto puede deberse entre otras cosas a que en las pruebas preliminares se haya usado un almidón de diferente pureza, características diferentes de agua desmineralizada, a la diferencia de condiciones entre el conductivímetro utilizado en las pruebas preliminares y el Analizador de Impedancia Eléctrica IM6.

Figura 31. Espectro de Impedancia Eléctrica de soluciones acuosas a diferentes concentraciones¹³ de almidón analítico CarloErba.

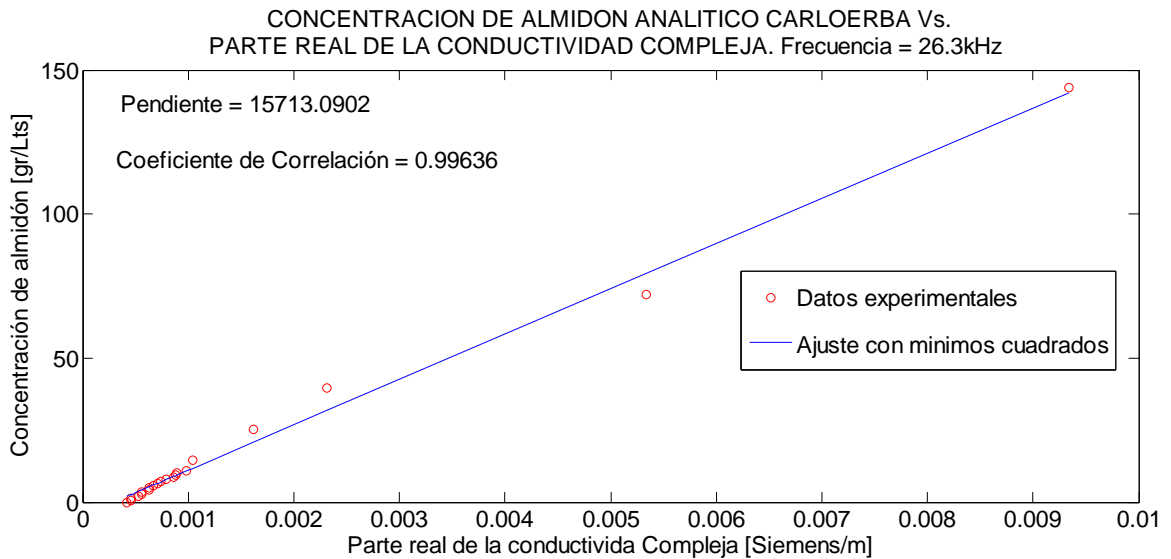


Por último también se hacen mediciones del espectro de impedancia eléctrica a soluciones acuosas a varias concentraciones de almidón analítico CarloErba, que como se puede ver en la figura 31 también muestra que al aumentar la concentración disminuye la magnitud (y la parte real) de la impedancia, con lo que se concluye que es el almidón quien predomina sobre los demás componentes del almidón de panadería en los cambios del espectro de Impedancia eléctrica, ya que el almidón analítico CarloErba no contiene ceniza, ni cianuros que inicialmente se tenían como posibles agentes del cambio de conductividad y que podrían predominar sobre el almidón.

Por otro lado, de igual manera como se hizo con el almidón de panadería se hace un análisis con respecto a la parte real de la conductividad compleja, para ver cómo cambia la conductividad a medida que aumenta la concentración de almidón analítico CarloErba en las soluciones acuosas.

¹³ Para la obtención de las concentraciones se debe tener en cuenta el grado de pureza del almidón de yuca utilizado en panadería (86.28%) quedando así la expresión de las concentraciones.
Concentración= 0.8628*peso[gr]/0.12Lts.

Figura 32. Concentración de almidón analítico CarloErba Vs. Parte Real de la Conductividad a una frecuencia fija de 26.3kHz.

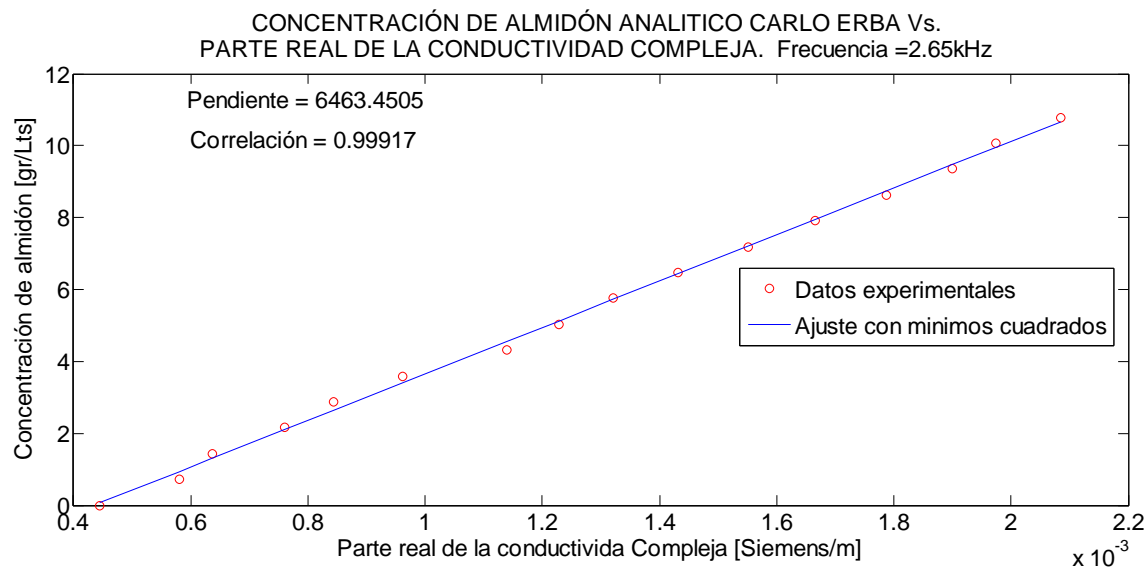


FUENTE: Autor del Proyecto.

En la figura 32 se expone que en soluciones acuosas a varias concentraciones de almidón analítico CarloErba hay una mejor correlación que la que se obtuvo con el almidón de panadería. Si ahora, al igual que como se hizo en las pruebas preliminares y en los análisis con almidón de panadería, se restringen los datos al rango de concentraciones de paso constante analizando también la variación de la pendiente y el coeficiente de correlación para el espectro de frecuencias.

En la figura 33 se expone algo que se esperaba, a una frecuencia de excitación de 2.65kHz existe una correlación de 0.99917 entre la concentración de almidón y la parte real de la conductividad compleja, mostrando concordancia con las pruebas preliminares que realizadas en un conductivímetro que excita a 2kHz se había obtenido una correlación de 0.9972. Sin embargo se obtiene una pendiente de 6463.45.

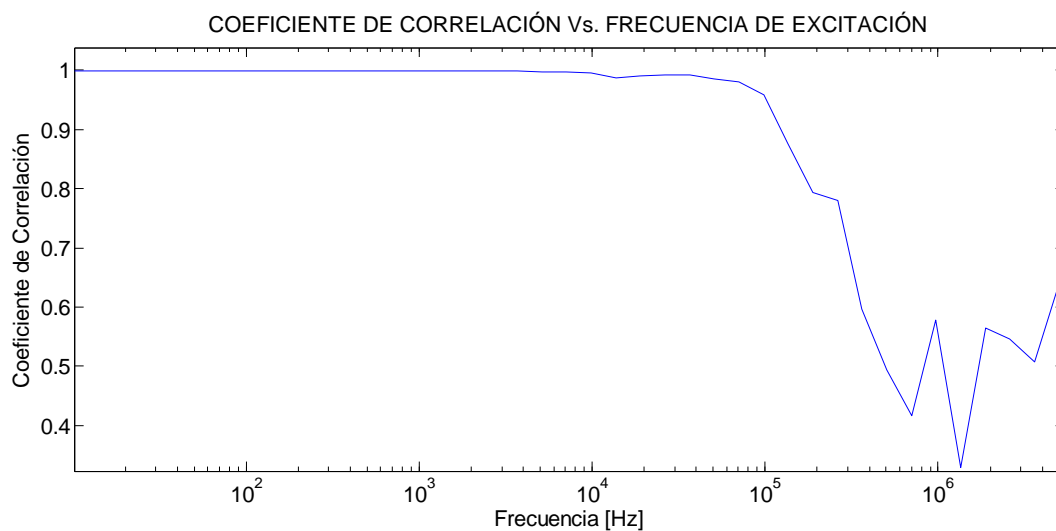
Figura 33. Concentración del contenido de almidón analítico CarloErba Vs. Parte real de la Conductividad Compleja. Reduciendo el análisis al rango de las variaciones de concentración de paso constante.



FUENTE: Autor del proyecto.

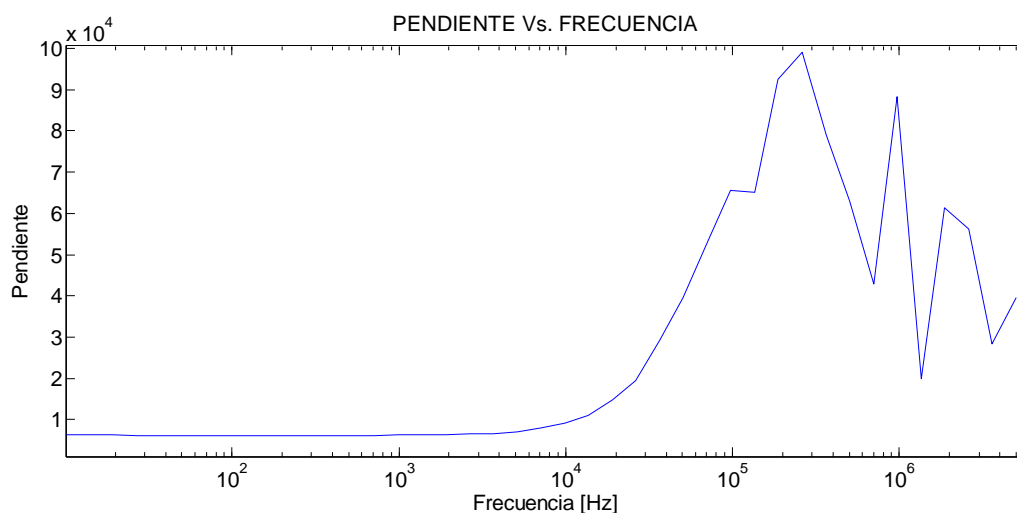
Con la misma intención del análisis con el almidón de panadería, en las figuras 34 y 35 se muestra un barrido en frecuencia del coeficiente de correlación y pendiente para estimar a cuales frecuencias es más clara la proporcionalidad directa entre la conductividad y el contenido de almidón, obteniéndose que hay una proporcionalidad casi perfecta hasta 10kHz, pero que igual se tiene buena proporcionalidad hasta 100kHz. Ésta relación lineal es mucho más clara utilizando almidón analítico que con el de panadería, es probable que la presencia de fibras en éste último ocasiona que no existe una directa proporcionalidad entre la conductividad y el contenido de almidón.

Figura 34. Barrido de frecuencia del factor de correlación entre la concentración de almidón CarloErba y la parte real de su conductividad compleja.



FUENTE: Autor del proyecto.

Figura 35. Barrido de frecuencia de la pendiente de la función de regresión entre la concentración de almidón CarloErba y la parte real de su conductividad compleja.



FUENTE: Autor del proyecto.

Aunque los valores de pendiente son diferentes, son del mismo orden que los del almidón de panadería y tienen un comportamiento semejante a lo largo del rango de frecuencias.

2.5 DISCUSIÓN

Con los resultados de las medidas de las pruebas preliminares se mostraron los primeros indicios de que la conductividad eléctrica de las soluciones acuosas de almidón agrio de yuca es directamente proporcional a su concentración de almidón. Aunque también se nota que los valores de las pendientes cambian a medida que aumentan las concentraciones deduciéndose que se debe a la existencia de un estado de saturación.

Para la realización de los experimentos de las pruebas preliminares y las mediciones del espectro de impedancia eléctrica de las soluciones acuosas de almidón analítico CarloErba y almidón de panadería, se estableció un protocolo y especificaciones para la realización de las medidas teniendo en cuenta las características de los dispositivos y la manipulación de los demás elementos que se utilizaron, además de los resultados obtenidos en las pruebas preliminares.

Para las medidas de los espectros de impedancia eléctrica era necesario calibrar el dispositivo de medida con respecto a un patrón de referencia. Ésta calibración se hizo tomando como referencia las conductividades de varias soluciones con diferentes cantidades de solución salina (NaCl) al 0.9%, medidas con el conductivímetro del laboratorio pruebas industriales de la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander.

En el proceso de calibración se logró suprimir la dispersión en baja frecuencia ocasionada por el comportamiento capacitivo de la interface electrodo electrólito, sin embargo no se pudo compensar satisfactoriamente la no linealidad del medidor de impedancia para frecuencias superiores a 10kHz, resolver esto se utilizó el comando “polyfit” de Matlab v7 con el que se obtuvieron constantes multiplicativas

y aditivas complejas condicionadas, de modo que al calibrar la parte imaginaria de la impeditividad sea cero. A pesar de esto se obtienen incongruencias como que la parte real de la impeditividad sea negativa, así que se acude a algoritmos genéticos que aunque logran desaparecer cualquier tipo de incongruencia se arrojan curvas no suaves, para nada atractivas para los análisis. Intentando entonces obtener lo mejor de los dos algoritmos de calibración se aplican primero los genéticos y luego se intentan suavizar pasando los datos por “polyfit”, pero finalmente aparecen nuevamente las ya mencionadas incongruencias, decidiéndose entonces calibrar con “polyfit” pero limitando el análisis del almidón diluido (tanto el de panadería como el analítico CarloErba) en agua desmineralizada hasta frecuencias de 100kHz aproximadamente.

De las mediciones de los espectros de impedancia eléctrica con los almidones diluidos en agua desmineralizada se concluye que para ambos (almidón de panadería y almidón CarloErba), la conductividad eléctrica de las soluciones es directamente proporcional a la concentración de almidón en las mismas, dando más peso a las hipótesis planteadas a partir de las pruebas preliminares, existiendo altos factores de correlación en los rangos donde los cambios de concentración de hacen a un paso constante. Y aunque las pendientes de los ajustes no son iguales si se comportan similarmente a lo largo del barrido en frecuencia, como también ocurre con los valores del coeficiente de correlación.

Este cambio de la conductividad se podría explicar con el modelo de suspensión de partículas esféricas, de igual manera como se modelan la sangre y las células en suspensión, por ejemplo, donde el electrolito de interés tiene una considerable conductividad iónica. Schwartz expuso el conocido *Counterion Relaxation Effects (Efecto de relajación de los iones de capa superficial)*, donde consideró el caso de una doble capa eléctrica en la superficie de las partículas esféricas. Los *counterions* o iones de capa están electrostáticamente limitados a la carga superficial de las esferas,

pero serán libres de moverse lateralmente a lo largo de la superficie de la esfera. Cuando un campo eléctrico externo es aplicado, los *counterions* positivos se mueven hacia el cátodo pero sin abandonar la superficie de su respectiva esfera. El restablecimiento a la capa original del *counterion* después de retirar el campo eléctrico externo se da por una difusión controlada y la correspondiente constante de tiempo de acuerdo a la teoría de Schawartz es

$$\tau = \frac{a^2}{2D}$$

Donde $D = \frac{\mu\kappa T}{e}$ y a es el radio de la partícula. (Grimnes S. y Grottem O., 2000).

Por último cabe anotar que la zona de dispersión beta se convierte en la mejor opción para medir el contenido de almidón en las raíces de yuca fresca, ya que los resultados obtenidos con el almidón en suspensión muestran un comportamiento lineal adecuado para establecer una relación numérica.

3. CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DE YUCA FRESCA

En éste capítulo se expone el desarrollo de los análisis realizadas a las raíces de yuca fresca, donde tiene parte el diseño de la sonda de medición, la calibración de la misma, medición del espectro de impedancia eléctrica con método de dos electrodos en las raíces de yuca, el cuidado de almacenamiento de las raíces y el análisis de los resultados

3.1 Planteamiento del experimento

De las medidas de impedancia eléctrica realizada a los almidones de panadería y analítico CarloErba en suspensión se concluye la existencia de proporcionalidad inversa entre la concentración de almidón y la magnitud de la impedancia eléctrica (cómo también de la parte real), lo que hace pensar que en las raíces de yuca fresca ocurre algo parecido, debe existir una proporcionalidad inversa entre el %AL y la magnitud (y parte real) de la Impedancia Eléctrica de las raíces.

Para las mediciones de impedancia en las raíces de yuca fresca se usa el analizador de espectros BAS-Zahner IM6 propiedad de la Corporación de la Investigación de la Corrosión (CIC) y se diseña una sonda de medición que permita hacer las mediciones en el centro de la raíz afectando de la menor manera posible la fisiología del tubérculo. Las medidas se toman siguiendo un protocolo establecido según algunos parámetros como el carácter perecedero de la yuca, el tiempo de postcosecha, el lugar de ubicación de la sonda, almacenamiento de las raíces, medición del contenido de almidón, y la realización de las mediciones de %AL a través del método de gravedad específica y espectrofotometría.

A nivel general el experimento consiste en obtener los espectros de impedancia eléctrica de 103 raíces de yuca fresca, medirles el %AL con la técnica de gravedad específica, escoger algunas raíces representativas para aplicarles análisis espectrofotométrico, armar una base de datos, finalmente se procesan

los datos para establecer alguna relación numérica entre el %AL obtenido químicamente y el EIE de las raíces, para luego establecer también relaciones con las medidas de %AL obtenidas con el método de gravedad específica. También de las 103 raíces se escogen 6 raíces para someterlas a un análisis químico que arroje de manera más exacta el valor del %AL y también relacionarlas numéricamente con los EIEs.

3.2 DISEÑO DE LA SONDA DE MEDICIÓN

Un elemento indispensable a la hora de realizar medidas de impedancia eléctrica son los electrodos. Para éste caso ellos son el transductor entre la corriente electrónica en los conductores del equipo de medición y la corriente iónica del tejido vegetal de la raíz de yuca. Esta discontinuidad se resuelve con un mecanismo de conducción, la corriente de desplazamiento en los electrodos y reacciones de oxido-reducción en los electrodos no polarizables.

La impedancia del electrodo, también conocida como impedancia de polarización, puede modelarse como una resistencia (R) y una reactancia (X) en serie cuyo valor decrece cuando la frecuencia se incrementa. Sin embargo, a pesar de que se puedan identificar los parámetros de la impedancia del electrodo, no se puede determinar un modelo preciso, ya que la magnitud depende del metal del electrodo, de su área, del electrolito utilizado, de la densidad de corriente y de la frecuencia de la utilizada en las medidas.

Para obtener el espectro de las raíces de yuca se necesita una sonda cuyos electrodos puedan introducirse más de 1cm dentro de la raíz, logrando medir el espectro aproximadamente en el centro de la raíz, por lo que se necesita que los electrodos además de tener características acordes para las mediciones eléctricas, deben contar con una resistencia mecánica que evite que se doblen o se venzan ante la dureza de las raíces de yuca.

Tabla 6. Cuadro comparativo entre los diferentes materiales para el diseño de electrodos. (Grimnes S. y Grottem O., 2000).

Electrodos de Plata/Cloruro de plata	Son de los más utilizados en medicina. El AgCl forma una capa no polarizable en el electrodo, es decir tiene un voltaje de polarización más pequeño que la mayoría de los otros tipos. Reaccionan fácilmente en medios biológicos.
Electrodos de Platino	Es inerte y bastante biocompatible. Con alta resistencia mecánica. Aunque puede tener un alto voltaje de polarización. Su precio es considerablemente alto, comparado con los demás
Electrodos de acero inoxidable	Se utiliza en electrodos de aguja, por su fortaleza, propiedades no corrosivas y bajo precio.
Electrodos de carbono	Son flexibles y apropiados para moldearse a cualquier anatomía.

FUENTE: Autor del proyecto.

Para la elección del material de los electrodos se analizan las propiedades de los materiales convencionalmente usados para la medición de bioimpedancia, comparando y concluyendo cual sería el que más se ajusta a nuestro caso, como se puede ver en la tabla 6.

Según lo descrito en la tabla 6, por su dureza, resistencia mecánica, alta conductividad y su bajo costo, el acero inoxidable se torna como la mejor elección para las condiciones de nuestro caso, asumiendo el cuidado que debe

tenerse por ser algo inadecuados para mediciones de pequeña señal y bajo nivel de inmunidad al ruido. Además en la industria agropecuaria se encuentran una gran gama de agujas hipodérmicas hechas de acero inoxidable tipo 304, lo cual fortalece su elección ya que al ser un producto común en el mismo mercado donde se mueven los insumos de cultivos de yuca lo hace mucho más barato y fácil de acceder para efectos de reposición.

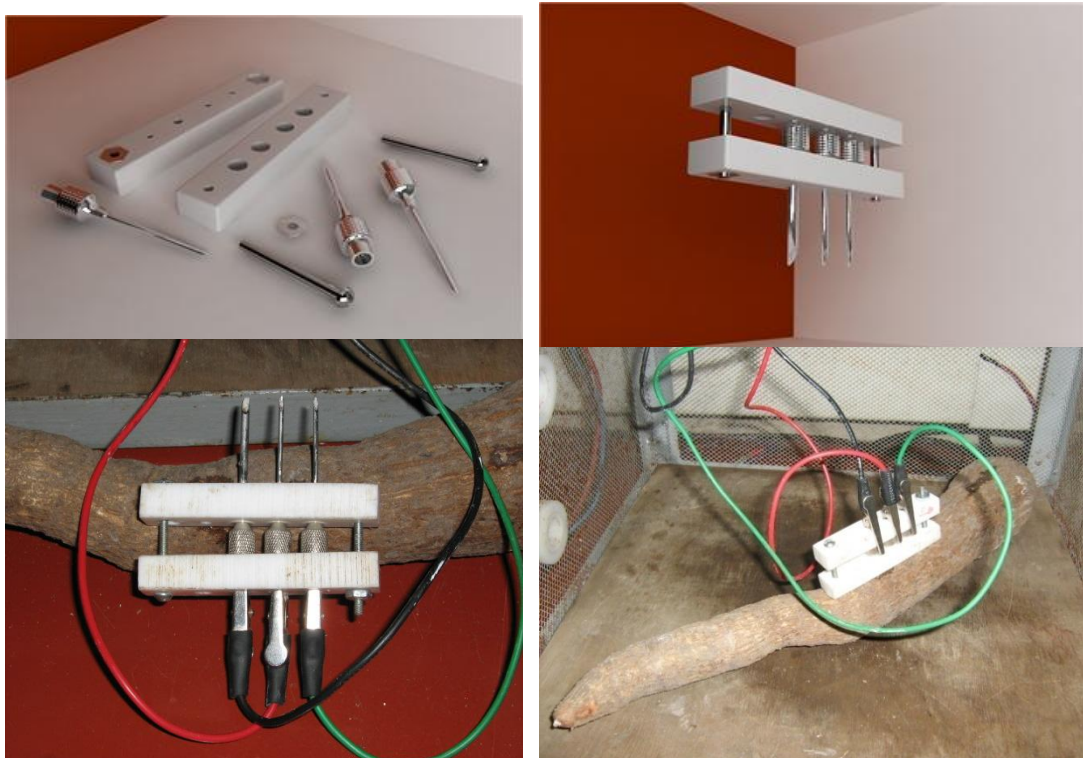
El acero tipo 304 es un acero inoxidable austenítico bajo en carbono, es el acero inoxidable más utilizado, se encuentra en equipos para la fabricación de alimentos y químicos, equipos para hospitales (donde es llamado como acero quirúrgico), la industria papelera, intercambiadores de calor, etcétera, y tiene una alta conductividad eléctrica de aproximadamente de $3 \cdot 10^6$ S/m. El cromo le da a este metal su resistencia al desgaste y corrosión. El níquel le da un acabado suave y pulido. El molibdeno le da mayor dureza y ayuda a mantener a agudeza del filo. En la tabla 7 se expone la composición química estandarizada para el acero inoxidable tipo 304.

Tabla 7. Análisis de la Composición química porcentual de acero inoxidable tipo 304¹⁴.

Fe [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Si [%]	Cr [%]	Ni [%]	C [%]	Mo [%]
63 a 69	2 máx.	0.045 max	0.03 máx	1máx	18 a 20	8 a 12	0.08 max	0.2 a 3

¹⁴ <http://www.protarsa.com/Inoxidable.html>. Última visita 28 de abril de 2008.

Figura 36. Imágenes de la sonda de medición para la medición de Espectroscopia de Impedancia Eléctrica en raíces de yuca.



FUENTE: Autor del proyecto.

La sonda se diseñó de tal modo que se pudiesen hacer medidas de espectroscopia de impedancia eléctrica con el método bipolar, tripolar, tetra polar y mediciones doblemente bipolar con electrodos de diferente diámetro. En el anexo A se pueden apreciar los planos con las dimensiones de la sonda y la ficha técnica de los componentes de la misma.

Para el diseño de la sonda de medición para la Espectroscopia de Impedancia Eléctrica en las raíces de yuca se usaron agujas hipodérmicas de acero tipo 304 marca SHARPVET de 14 x 1 y ½ “. (1.65mm de diámetro y 38 mm de largo) arregladas en una base doble de teflón, un dieléctrico que permite aislar una aguja de otra, evita que estas se doblen, garantiza que las agujas mantengan una distancia constante entre sí y tiene orificios perfectos para la conexión de caimanes y bananas, como se ve en la figura 36.

3.3 PRUEBAS PRELIMINARES

Luego de haber diseñado la sonda de medición, la pregunta que sigue por responder es ¿En qué parte de raíz deben hacerse las mediciones de impedancia eléctrica?

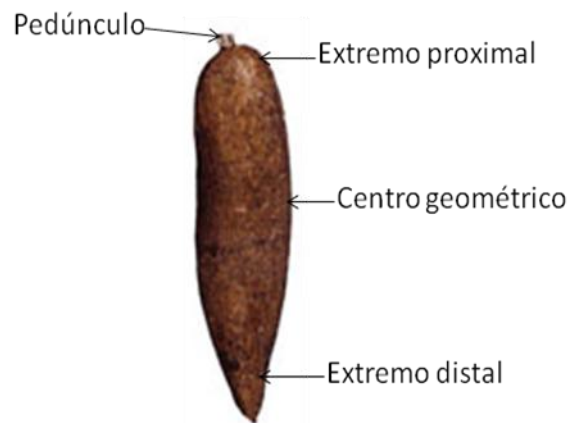
Para responder éste interrogante vale la pena recordar que las raíces de yuca cuando aún están en la planta, inicialmente forman un sistema fibroso, pero después algunas de ellas (generalmente menos de 10) inician su engrosamiento y se convierten en raíces tuberosas cargadas de almidón. La planta absorbe el agua, y los nutrimentos por medio de las raíces fibrosas, capacidad que pierde cuando se transforman en tuberosas. En un principio no existe diferencia entre las raíces fibrosas y las tuberosas. La diferencia radica en que en el momento en que se inicia la acumulación de almidones, el sentido del crecimiento de la raíz cambia de longitudinal a radial. Sin embargo, esto no implica necesariamente que la raíz detenga su crecimiento longitudinal de manera absoluta. (Ospina B. y Cevallos H. 2007).

En una planta de yuca adulta se distinguen la porción tuberosa que en su extremo distal puede mantener su carácter fibroso y en su extremo superior o proximal, el cuello ó “pedúnculo”, mediante el cual las raíces tuberosas permanecen unidas al tallo (Ver figura 37).

Como la raíces no detienen su crecimiento y su almacenamiento de almidón, es seguro que la concentración de almidón no es homogénea en toda la raíz, incluso es de suponer que las zonas más cercanas al extremos proximal deben tener mayor %AL que las cercanas al extremos distal que están en periodo de crecimiento y aun mantienen buena parte de su condición fibrosa. Por lo que basándonos en los experimentos con almidón en suspensión es también de esperarse que la magnitud y la parte real de la impedancia eléctrica sea menor en zonas cercanas al extremo proximal que en zonas cercanas al extremo distal. Para evaluar esta hipótesis se hicieron medidas con la sonda en 3

partes longitudinales de varias raíces, una cerca de la zona proximal, otra en el centro geométrico y otra cerca al extremo distal.

Figura 37. Posición longitudinal de una raíz de yuca y ubicación de las partes externas de una raíz de yuca



FUENTE: Autor del proyecto.

Como se ve en la figura 38 muestra que sí existe una caída de los valores de magnitud cuando las medidas se van haciendo más cerca del extremo distal.

Como las medidas de espectroscopia de impedancia eléctrica se relacionan con los resultados de %AL obtenidos por espectrofotometría en los laboratorios SIAMA, y considerando que el almidón no se encuentra homogéneamente distribuido en la raíz de yuca, la zona que debe seleccionarse para hacer las mediciones de impedancia eléctrica en las raíces debe ser la misma donde se extraiga la muestra para el análisis químico. Entonces teniendo en cuenta que la zona de más fácil ubicación en la raíz es su centro y que es de las zonas donde el contenido de almidón es aproximadamente constante, se decide que las medidas de impedancia y la extracción de muestras se hacen en el centro geométrico del tubérculo.

Figura 38. Medidas de Impedancia en tres partes de la raíz.

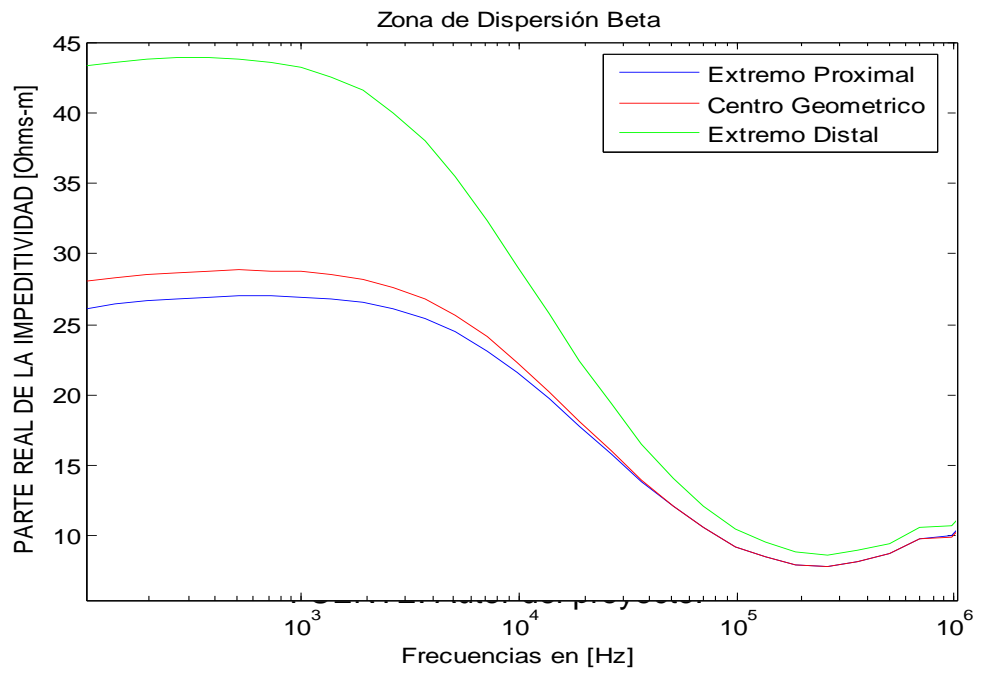
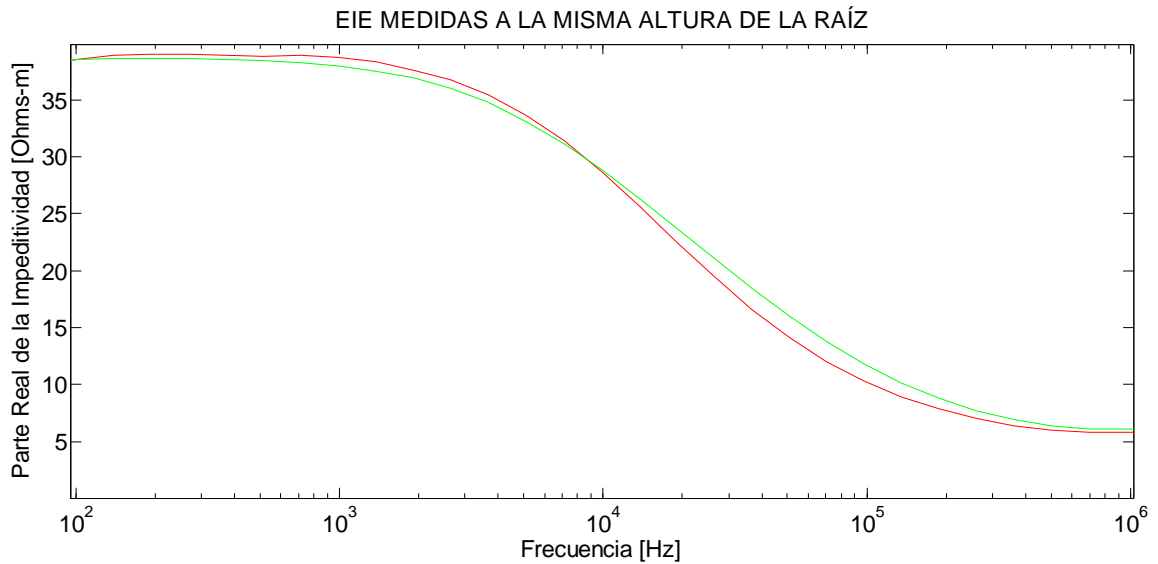


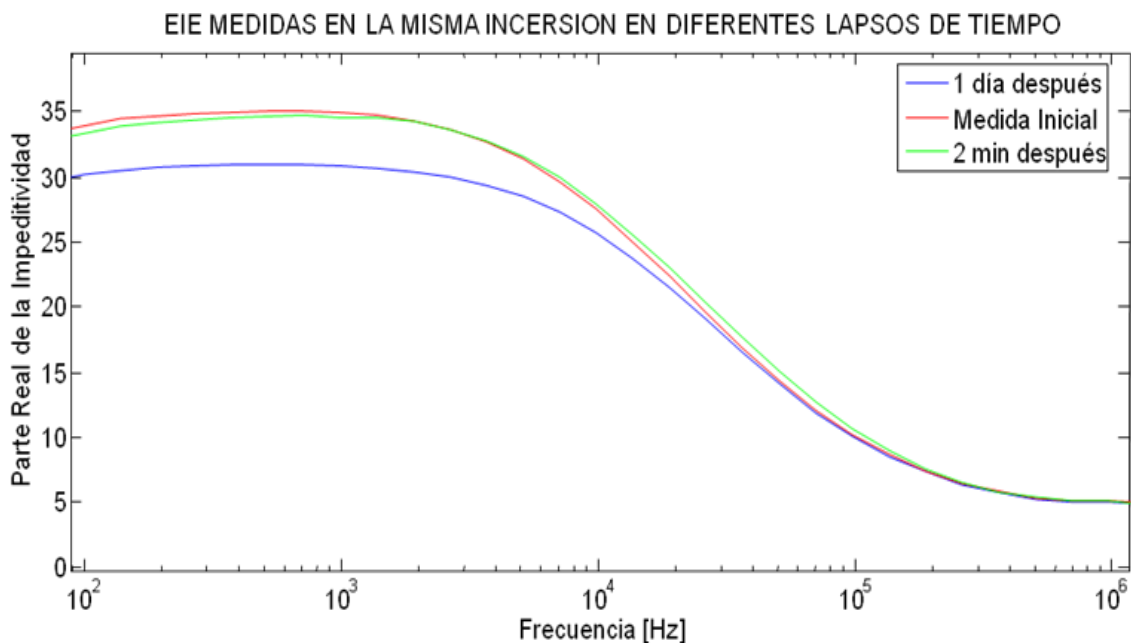
Figura 39. Espectros de Impedancia eléctrica en diferentes inserciones pero a la misma altura de una raíz de yuca.



FUENTE: Autor del proyecto.

Otro aparte interesante y que corrobora lo anteriormente mencionado es que al medir a la misma altura de la yuca pero en diferentes inserciones los espectros son muy parecidos, como se puede ver en la figura 39.

Figura 40. Espectros de impedancia eléctrica medidas en las misma inserción a diferente lapsos de tiempo.



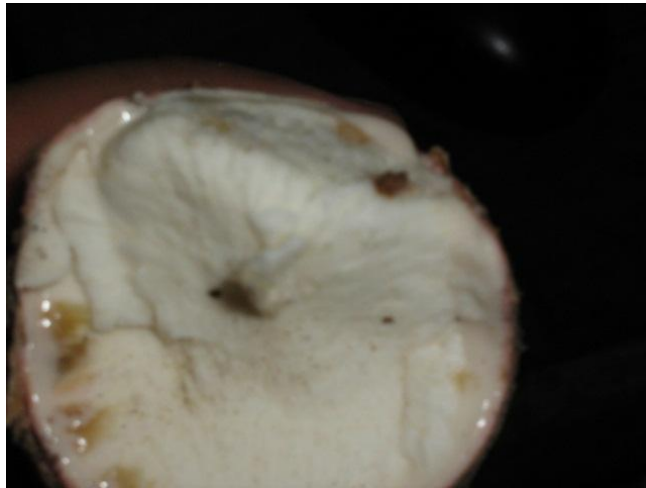
FUENTE: Autor del proyecto.

Por otro lado, es normal preguntarse en la evaluación de un método de éstos acerca de qué tan buena es la repetitividad de las medidas y bajo qué condiciones se encuentra limitada esta repetitividad, en la figura 40 se muestra las medidas de impedancia eléctrica realizadas en diferentes momentos, notándose la invariabilidad de la misma para lapsos cortos de tiempo sin embargo después de un días la magnitud de la impedancia disminuye lo que se aduce a la disminución del ph en la yuca producido por la descomposición que ha empezado a sufrir la raíz debido a que no se almacenó adecuadamente, como se puede ver en la figura 41.

Precisamente como se verá más adelante, para evitar el deterioro fisiológico tan rápido de las raíces de yuca se usa un pesticida llamado Mertect 500 S,

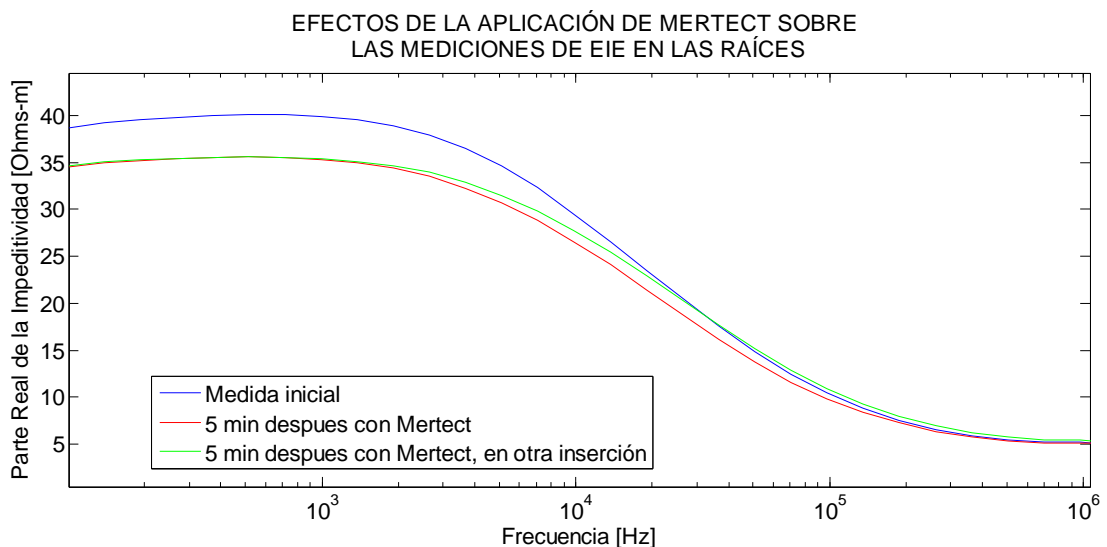
pero que también afecta las medidas de EIE luego de su aplicación. En la figura 42 se muestra cómo afecta la aplicación del pesticida a las medidas realizadas el mismo día. En la figura 42 se muestra un decaimiento de la parte real de la impedancia al hacer la medida luego de haber aplicado Mertect 500 S, incluso si se hace otra inserción a la misma altura de la primera se obtiene el mismo efecto, contrario a lo que se esperaría lo que y lo que se aduce al efecto que puede producir el pesticida en la corteza de la raíz

Figura 41. Imagen de una raíz de yuca con deterioro fisiológico un día después de haberle realizado la medición de EIE.



. FUENTE: Autor del proyecto.

Figura 42. Efecto de la aplicación del pesticida Mertect sobre las medidas de impedancia eléctrica en las raíces de yuca. FUENTE: Autor del proyecto



Por lo que se concluye en estas pruebas preliminares que las medidas de impedancia eléctrica se deben hacer antes de aplicar el pesticida Mertec para evitar efectos nocivos sobre las medidas reales en las raíces.

3.4 PROTOCOLO DE MEDICIONES

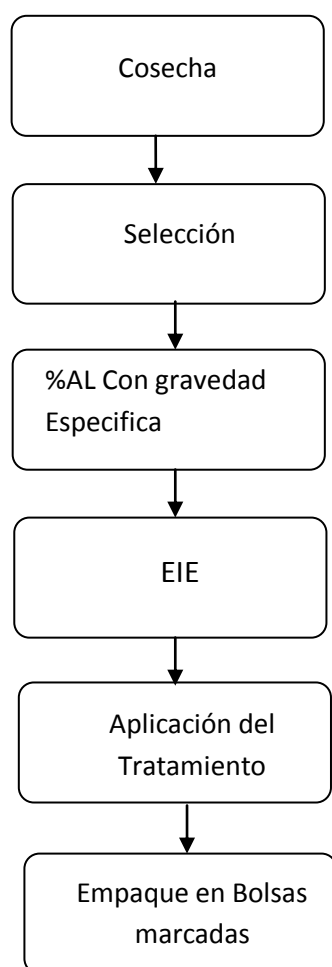
Para la realización de las medidas de impedancia eléctrica de las raíces y su posterior traslado de la CIC en la sede Guatiguará de la UIS a los laboratorios SIAMA en la Carrera 36 con calle 24 de Bucaramanga (45 minutos aproximadamente de transporte) para la realización del análisis de espectrofotometría, hay varios factores que se deben tener en cuenta para la conservación fisiológica de las yucas, como la cosecha de las raíces, la selección de las mismas, y los cuidados de almacenamiento que se deben aplicar mientras se hacen las medidas eléctricas y se hacen las pruebas químicas de laboratorio.

Las raíces de yuca sufren efectos severos a la intemperie, a condiciones ambientales pueden dañarse en 3 días cambiando su fisiología severamente. Ésta deterioración fisiológica necesita oxígeno para su desarrollo y, además, involucra reacciones enzimáticas. Su control se puede lograr evitando el acceso de oxígeno a los tejidos parenquimatosos o, por otro lado, inhibiendo las reacciones enzimáticas. El almacenamiento en una atmósfera de gases con nitrógeno, o en el vacío, evitará la presencia del oxígeno ambiental. También, el uso de una barrera artificial, parafina por ejemplo, como una capa delgada cubriendo la raíz, tiene el mismo resultado. Almacenamiento en temperaturas bajas (2°C) es necesario para lograr la inhibición de las enzimas de polifenoloxidasas y otras que conducen a la formación de los pigmentos sintomáticos del deterioro fisiológico. Todos los anteriores sistemas implican un alto costo de maquinaria especializada.

La deterioración fisiológica empieza a desarrollarse cerca de los puntos de daño de la raíz ocasionados al momento de la cosecha, porque ahí la entrada de oxígeno es más rápida. Pero la raíz cuenta con la capacidad de curarse en

4 a 5 días bajo condiciones optimas: temperatura de 30°C y en una humedad relativa de 75%. Sin embargo estas son las condiciones para que se desarrollen bacterias y patógenos que también ocasionan deterioro. Además en el proceso de curación hay una disminución del contenido de almidón y un aumento proporcional de los azucres.

Figura 43. Diagrama que muestra el flujo de actividades que comprende el método de conservación de la yuca en bolsas de polietileno.



FUENTE: (Ospina J, 2002)

Sin embargo, en los últimos años se enfrenta el problema microbial con un fungicida que no afecta la salud humana y contando con la fortuna que la yuca tiene una cáscara gruesa (aproximadamente 15% al 20% del peso fresco de la raíz).

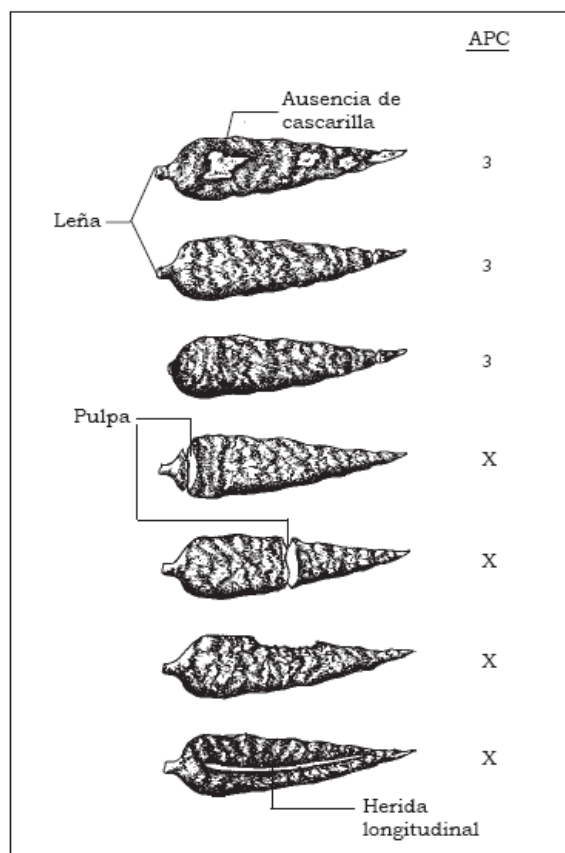
El método de conservación que cumple todos los requerimientos de éste proyecto, por economía, facilidad y que garantiza un tiempo de conservación de hasta 20 días, es el método de almacenamiento en bolsas de polietileno y un fungicida, Mertect 500 S (CIBA-GEIGY) cuyo ingrediente activo es tiabendazole.

En éste método debe considerarse aspectos importantes como el tiempo entre la cosecha y el momento del empaque, el efecto del sol en la calidad de las raíces, y la coordinación de las actividades que requiere el método.

Las etapas en que se organiza las actividades de éste método (Figura 43) son las siguientes:

3.4.1 Cosecha de las raíces.

Figura 44. Aptitud de las raíces de yuca para ser conservadas teniendo en cuenta el daño que hayan sufrido durante la cosecha.



APC = Aptitud para la conservación.

X = Poco apta.

FUENTE: (Ospina J, 2002)

Las raíces se cosechan entre los 8 y os 12 meses de edad de las plantas (época de mayor rendimiento). La cosecha debe hacerse con cuidado para no partir las raíces ni ocasionarles daños físicos apreciables. En la figura 44 se observan diferentes daños y su efecto en la aptitud de la yuca para su conservación.

Se hace cosecha manual, separando la raíz del tallo (el tocón) con ayuda de un machete o de unas tijeras de jardinero. Este instrumento es el más adecuado ya que permite hacer un corte preciso y cuidadoso que causa menos daños. Se deja adherido a la raíz un trozo pequeño de pedúnculo para que el parénquima no quede expuesto al aire (Ver Figura 45).

Figura 45. Una buena práctica de cosecha es dejar adherido un pedazo de pedúnculo a la raíz.



FUENTE: (Ospina J, 2002)

3.4.2 *Empaque y tratamiento.*

En esta etapa hay que considerar varios aspectos y actividades:

1. *Tiempo entre cosecha y empaque.* Los ensayos experimentales y la experiencia concuerdan con la necesidad de realizar las operaciones de empaque y tratamiento lo más rápidamente posible después de la cosecha. Una demora mayor a 4 horas podría causar la pérdida total del producto por deterioro fisiológico. Se recomienda que el tiempo transcurrido entre la

cosecha, la medición de EIE y el empaque sea menor a 3 horas; esto requiere que las labores respectivas se hagan en el lote de la cosecha o en un sitio cercano a él.

2. *Efecto del sol.* La exposición directa de las raíces al sol, durante períodos prolongados aumenta la posibilidad de pérdidas de las raíces por deterioro fisiológico. Esta pérdida puede evitarse cosechando, haciendo las medidas de EIE y empacando las raíces en las primeras horas de la mañana o bien entrada la tarde o a la sombra en el sitio de la cosecha.

3. *Materiales y equipo para el tratamiento* en el proceso de empaque

- Una bomba aspersora.
- El fungicida: Mertect 500 S.
- Bolsas de polietileno de 4 Kg, miden 21x12 cm. y su espesor o calibre es de 0.4 mm.
- Marcador permanente para marcar las bolsas
- Una balanza de manejo fácil; debe estar en buenas condiciones.
- Cauchos de billetes para ajustar las bolsas.

4. *Procedimiento.* Comprende los siguientes pasos: empacar las raíces de yuca seleccionadas a las que ya se les haya hecho las medidas de EIE, tratarlas con el fungicida, y disponerlas para su transporte.

- Se empacan sólo las raíces seleccionadas, se colocan en posición vertical, con el pedúnculo hacia arriba. Cada bolsa corresponde a una raíz
- Se aplica luego el tratamiento a las raíces en las bolsas. Consiste en una solución fungicida a base de Merfect 450 FW, de concentración 0.4%, que se prepara así:
 - Se llena con agua el tanque de la bomba fumigadora (en este caso, 20lt) y se agregan 80ml (0.08lt) de Mertect (o sea, el 0.4% de 20 000ml). La mezcla se agita fuertemente con un palo o con la lanza de la bomba.
 - Se colocan el filtro y la tapa de la bomba. La solución fungicida queda así lista para ser aplicada.
 - Se introduce luego la lanza de la bomba en cada una de las bolsas y se bañan las raíces con la solución, en especial los extremos de la raíz (Figura

46). Para tratar una bolsa de 4kg se gastan, aproximadamente, 100 ml de solución;

Figura 46. Para aplicar el tratamiento del fungicida, se introduce la lanza de la aspersora en el interior de las bolsas y se bañan con ella bien todas las raíces.



FUENTE: (Ospina J, 2002

Figura 47. Un corte en diagonal del fondo de la bolsa por donde drena el exceso de solución aplicada.



FUENTE: (Ospina J, 2002

- Se elimina el excedente de solución fungicida que quede dentro de la bolsa para que el exceso de humedad interna no favorezca el rápido desarrollo de los hongos. No es muy práctica la operación de invertir con cuidado la bolsa para que drene el exceso de líquido porque pueden salirse las raíces y representa, además, una actividad adicional de mano de obra. Se recomienda, más bien, hacer cortes en diagonal en las esquinas inferiores de las bolsas antes de la

operación de empaque (Figura 47). Estos cortes son prácticos, permiten drenar el líquido excedente y a regular la humedad interior de las bolsas, sobre todo cuando se ha cosechado en época lluviosa en que la humedad es excesiva. Esta práctica favorece mucho la conservación de las raíces.

- Se cierran las bolsas doblando 2 ó 3 veces su boca sellando, se sella con el caucho y se marca la raíz de tal manera que se arroje información de la fecha y del archivo con que fue guardado en el disco duro del computador del IM6. (Figura 48).

Figura 48. Imagen de la manera como se empaacan las raíces, marcando el empaque con información necesaria de la raíz.



FUENTE: Autor del Proyecto

Se finaliza la información acerca del método de almacenamiento para la conservación de las raíces, exponiendo en la tabla 8 los cambios en la calidad de las raíces almacenadas en bolsas de polietileno y bañadas con Mertect 500S.

Tabla 8. Cambios en la calidad de las raíces almacenados en bolsas de polietileno de 4kg tratados con Mertect 500 S.

Tiempo de Almacenamiento (semanas)	% Materia Seca	% Almidón (base seca)	% Azúcares (totales)	Tiempo de Cocción (minutos)	Sabor/Textura
0	36.46	89.8	4.10	35.5	Bueno/blando
1	36.53	85.7	5.17	33.3	Bueno/blando
2	35.43	84.7	2.67	38.4	Bueno/blando

Fuente: (Domínguez C., 1983)

3.4.3 Especificaciones generales del cumplimiento protocolo de mediciones

El protocolo se cumplió de la siguiente manera

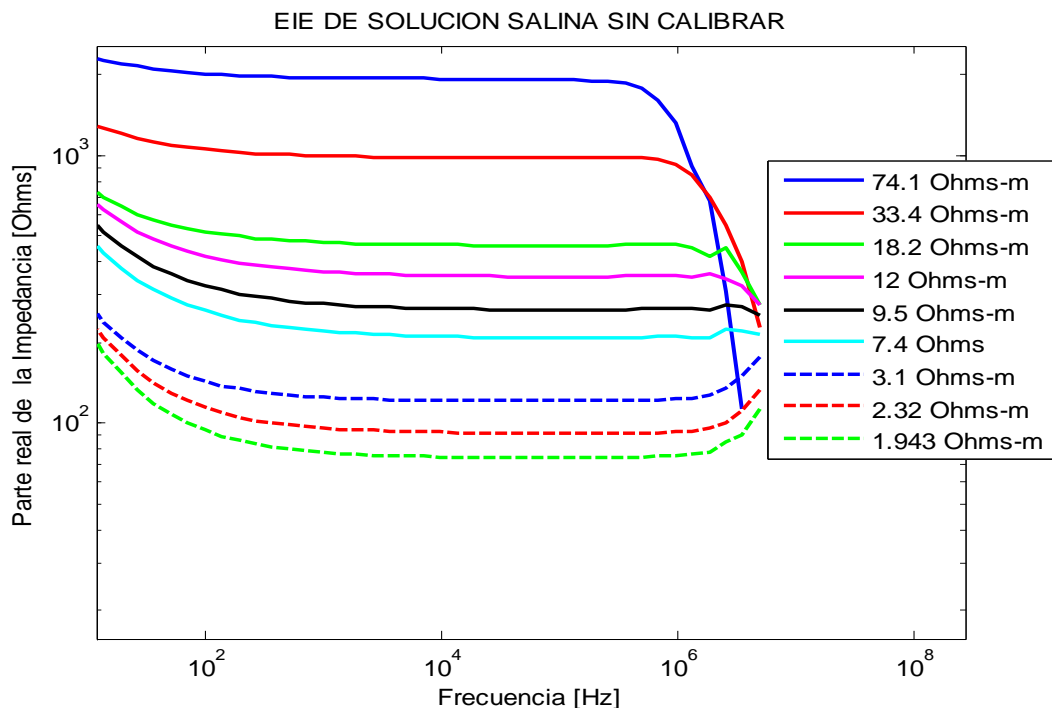
1. Se ubicaron cultivos de yuca en las inmediaciones de la sede Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander en la vereda el Manantial, para no perder mucho tiempo en desplazamiento.
2. Ubicados los cultivos, se compraron las yucas y se cita un día para la cosecha de cada lote y supervisar personalmente la cosecha. Cada día se tomaran aproximadamente entre 20 y 30 raíces. Las cosechas se hicieron alrededor de las 6:00 a.m., siguiendo las recomendaciones del CIAT.
3. Fue de interés seleccionar raíces de matas que estuvieran bastante cerca, para suponer homogeneidad en la calidad del suelo.
4. En el mismo lugar del cultivo se realizaron las mediciones correspondientes al método de gravedad específica para la determinación del %AL.
5. Ese mismo día las raíces se transportan a la sede Guatiguará para hacer las medidas de impedancia eléctrica, por lo que debieron coincidir los días de cosechas con los días de disponibilidad del Analizador de Impedancia Eléctrica BAZ-SAHNER IM6.

6. Al final de la jornada se empaacan las raíces siguiendo según lo establecido en el protocolo de empaque.
7. Luego las raíces se llevan a los laboratorios SIAMA donde fueron sometidas a los análisis espectrofotométricos para determinar de la manera más precisa su contenido de almidón, recordando al laboratorista hacer el muestreo en la misma zona donde se hicieron las inserciones para medir el espectro de impedancia eléctrica.

3.5 CALIBRACION DE LA SONDA DE MEDICION

La sonda se calibró siguiendo el mismo método y con los mismos patrones de referencia de conductividad que se usaron para la calibración de la celda con la que se hizo las mediciones con el almidón en suspensión, pero sólo tomando los valores de conductividad que corresponden al rango de valores de las impedancias a medir (Jaimes S. 2006). En las figuras 49 y 50 se puede ver las medidas de la impedancia eléctrica antes y después de la calibración respectivamente.

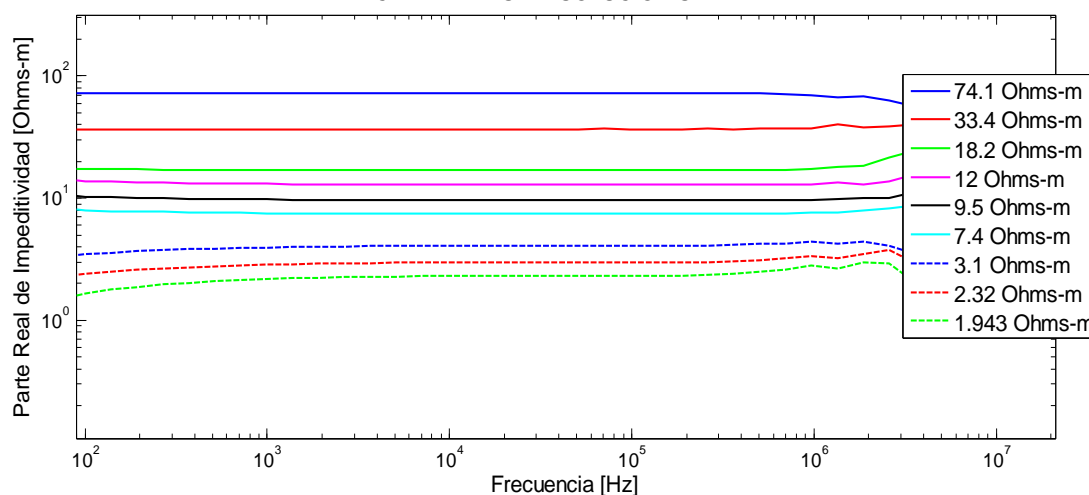
Figura 49. Espectro de impedancia eléctrica sin calibrar de varias cantidades de solución salina al 0.9% disueltas en agua desmineralizada.



FUENTE: Autor del Proyecto

En la figura 49 se puede ver nuevamente la dispersión causada por la interface electrodo electrolito a baja frecuencia, sin embargo vemos que la sonda tiene un mejor comportamiento a altas frecuencias que la celda utilizada en para las pruebas con el almidón diluido, ya que vemos que sin calibrar los valores de parte real de las impedancia se mantienen constante hasta aproximadamente 1Mhz, lo cual fortalece aun más la valoración de los criterios de selección del material y geometría de los electrodos.

Figura 50. Espectro de Impedancia Eléctrica calibrado de diferentes cantidades de solución salina al 0.9%. EIE CALIBRADA DE DIFERENTES CANTIDADES DE SOLUCION SALINA



Fuente: Autor del Proyecto

Como se ve en la figura 50 es notorio el mejor efecto que tiene el método de calibración en la sonda en comparación con la celda utilizada en el experimento anterior, para este caso se pueden analizar los datos tranquilamente hasta 1Mhz. En la tabla 9 se presentan los valores de las constantes multiplicativa ya aditiva con las que se deben calibrar las mediciones realizadas a las raíces con el medidor de impedancia BAS-ZAHNER IM6, con el método de dos electrodos.

Tabla 9. Valores de las constantes multiplicativas y aditivas para la calibración de la sonda de medición para raíces de yuca fresca.

Frecuencia	Constante multiplicativa "m"	Constante aditiva "b"
5000000	-0.0193 + 0.0714i	6.0198 -17.3267i
3602200	0.0002 + 0.0654i	4.0888 -14.8007i
2595100	0.0111 + 0.0532i	3.3288 -12.0962i
1869600	0.0206 + 0.0421i	1.8904 - 8.8799i
1346900	0.0279 + 0.0363i	0.8352 - 7.7412i
970370	0.0310 + 0.0262i	0.6353 - 5.7712i
699090	0.0341 + 0.0187i	0.1469 - 4.1190i
503640	0.0359 + 0.0130i	-0.1434 - 2.8527i
362840	0.0371 + 0.0090i	-0.3329 - 1.9734i
261400	0.0377 + 0.0065i	-0.4425 - 1.4077i
188320	0.0380 + 0.0048i	-0.4870 - 1.0244i
135670	0.0381 + 0.0035i	-0.4970 - 0.7456i
97744	0.0381 + 0.0025i	-0.4986 - 0.5170i
70418	0.0382 + 0.0018i	-0.5192 - 0.3421i
50731	0.0381 + 0.0013i	-0.4973 - 0.2531i
36549	0.0380 + 0.0010i	-0.4985 - 0.1617i
26331	0.0380 + 0.0007i	-0.5040 - 0.0887i
18970	0.0380 + 0.0006i	-0.5108 - 0.0292i
13666	0.0380 + 0.0004i	-0.5167 + 0.0259i
9845.7	0.0379 + 0.0004i	-0.5289 + 0.0807i
7093.1	0.0379 + 0.0003i	-0.5413 + 0.1388i
5110.1	0.0379 + 0.0003i	-0.5609 + 0.2015i
3681.5	0.0379 + 0.0003i	-0.5850 + 0.2740i
2652.3	0.0378 + 0.0003i	-0.6129 + 0.3622i
1910.8	0.0378 + 0.0003i	-0.6505 + 0.4768i
1376.6	0.0377 + 0.0004i	-0.6990 + 0.6214i
991.74	0.0377 + 0.0005i	-0.7562 + 0.8033i
714.48	0.0376 + 0.0006i	-0.8301 + 1.0440i
514.74	0.0375 + 0.0007i	-0.9301 + 1.3543i
370.83	0.0374 + 0.0009i	-1.0416 + 1.7581i
267.16	0.0372 + 0.0011i	-1.1868 + 2.2847i
192.47	0.0371 + 0.0015i	-1.4000 + 2.9624i
138.66	0.0368 + 0.0017i	-1.6249 + 3.9025i
99.897	0.0365 + 0.0022i	-1.9933 + 5.0666i
71.969	0.0360 + 0.0027i	-2.4337 + 6.6200i
51.795	0.0355 + 0.0032i	-3.0570 + 8.6343i

37.276	$0.0347 + 0.0039i$	$-3.9156 + 11.1821i$
26.827	$0.0335 + 0.0048i$	$-5.1221 + 14.3515i$
19.307	$0.0320 + 0.0058i$	$-6.8224 + 18.1637i$
13.895	$0.0300 + 0.0068i$	$-9.1364 + 22.4266i$
10	$0.0271 + 0.0078i$	$-12.1238 + 26.7264i$

Fuente: Autor del Proyecto

Como se ve en la tabla 9 los valores de las constantes multiplicativa y aditiva son complejos debido a que los valores de impedancia están precisamente expresados en parte real y parte imaginaria.

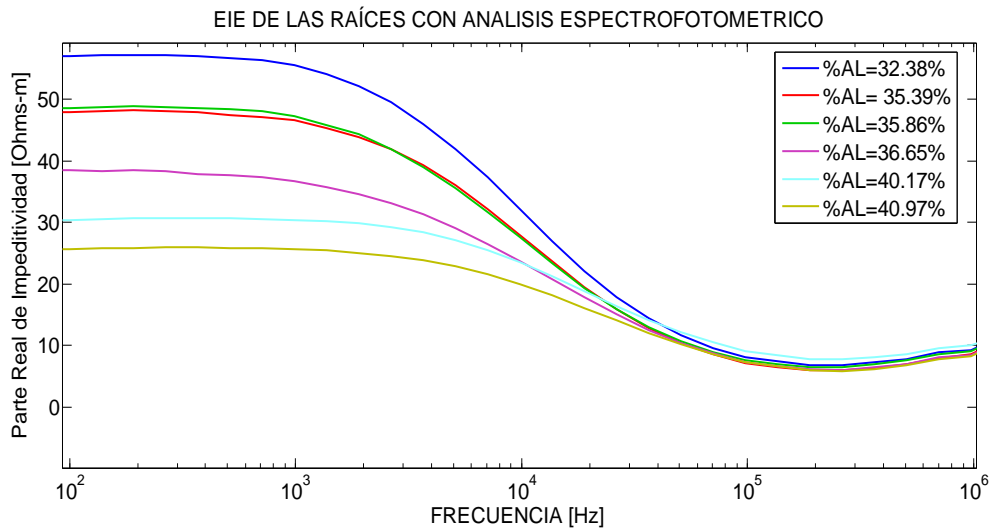
3.6 RESULTADOS

De la base de datos conformada por 104 raíces se escogieron 6 raíces para que se les determinara su contenido de almidón (%AL) a través de espectrofotometría. Los criterios de selección se basaron en tomar 4 raíces que tuvieran sus espectros marcadamente diferentes y dos raíces que tuvieran sus espectros muy parecidos.

Luego de haber calibrado, en la figura 51 se muestran los espectros de las 6 raíces analizadas con espectrofotometría con sus respectivos contenidos de almidón "%AL".

Tal como se esperaba, partiendo de las hipótesis generadas con los experimentos de almidón diluido y las pruebas preliminares, en la figura 51 se nota que a medida que aumenta %AL disminuye la parte real de la impedancia de las raíces, incluso los espectros iguales que se seleccionaron mostraron un contenido de almidón prácticamente igual.

Figura 51. Espectro de Impedancia eléctrica de las 6 raíces analizadas con espectrofotometría para determinar su contenido de almidón



Fuente: Autor del Proyecto

Luego de calibrar los datos se ajustaron según el modelo de Cole-Cole en la zona de dispersión beta. Éste modelo se usa generalmente para emular el comportamiento de los dieléctricos a partir de la siguiente expresión:

$$\rho = \rho_{\infty} + \frac{\rho_0 - \rho_{\infty}}{1 + (j\omega\tau)^{\alpha}}$$

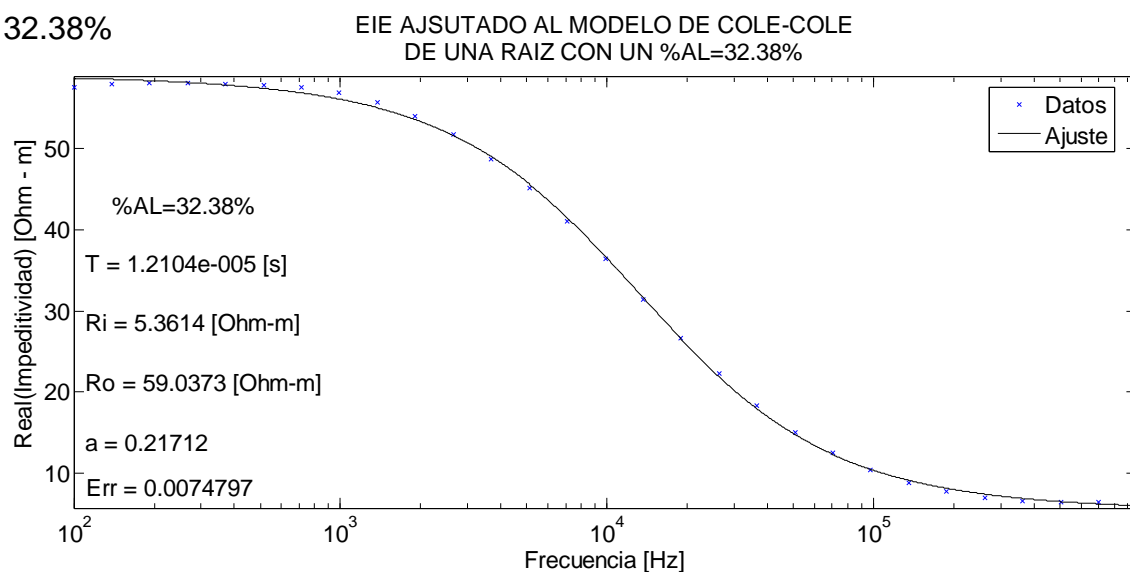
Donde ρ es la parte real de la impedancia, ρ_0 es la resistividad a frecuencias bajas, ρ_{∞} es la resistividad a altas frecuencias y τ la constante de tiempo de relajación. Estos parámetros son los que se pretenden relacionar con alguna propiedad química fisiológica de la muestra medida, en este caso con el %AL. Según los resultados obtenidos para el almidón en suspensión era muy probable que el %AL estuviese relacionado con la resistividad a bajas frecuencias. Para aplicar el ajuste se utilizó una rutina diseñada por el Profesor David Miranda Mercado (Director del Grupo CIMBIOS) y publicada en el artículo "Determination of Cole-Cole parameters using only the real part of electrical impedivity measurement" (Miranda D. y López A., 2008).

Luego de obtener los ajustes se tabulan los parámetros del modelo de Cole-Cole para los espectros de cada una de las raíces, luego se establece con cuál

de ellas se tiene mejor relación y se define entonces una expresión numérica que establezca el contenido de almidón a partir del valor de impedancia (o conductividad). Cabe anotar que ésta relación sólo se aplica para las 6 raíces a las que se les hizo análisis espectrofotométrico, ya que el método de gravedad específica genera muchas dudas debido a que en cada muestra hay alrededor de 7 a 9 raíces, que por lo general cada una tiene un espectro de impedancia diferente, convirtiéndose en un inconveniente a la hora de correlacionar, ya que todas las raíces se les asigna el valor de %Al correspondiente a la muestra a la que pertenece, es decir, cada raíz tiene un %Al grupal que suele ser diferente al individual. El método de gravedad específica supone igualdad de condiciones climáticas y de suelos para todas las raíces, lo cual no es necesariamente garantiza que las raíces de un mismo cultivo tengan igual %Al, así que para estudios donde se necesite conocer %AL en cada una de las raíces el método de gravedad específica no es recomendable. Esto sin sumar la falta de experiencia con este método que pudo introducir un error considerable.

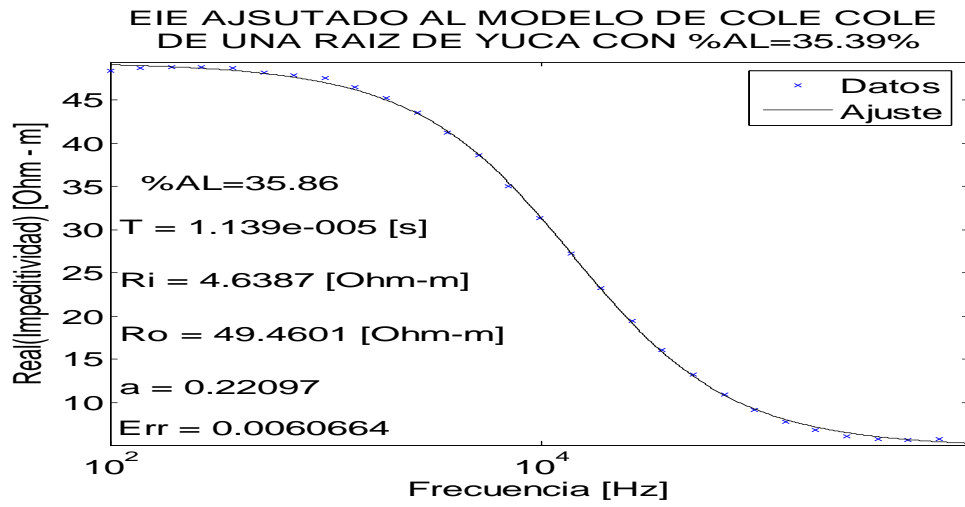
Las siguientes son las figuras que muestran como los espectros de las 6 raíces calibradas se ajustan al modelo de Cole Cole.

Figura 52. Espectro de Impedancia Eléctrica de una raíz de yuca con %AL= 32.38%



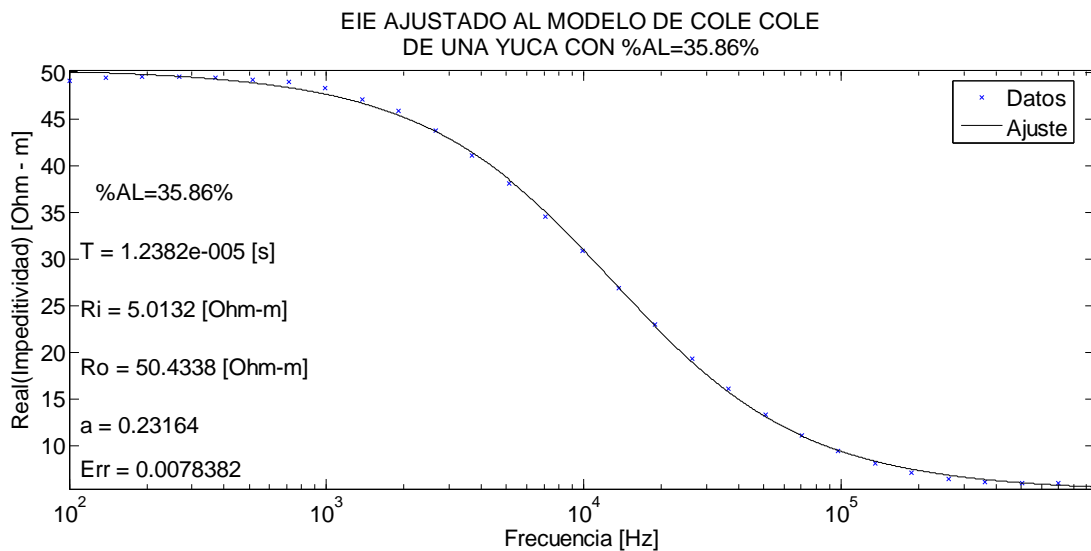
Fuente: Autor del Proyecto

Figura 53. Espectro de impedancia eléctrica ajustado al modelo Cole Cole de una yuca con %AL= 35.39%.



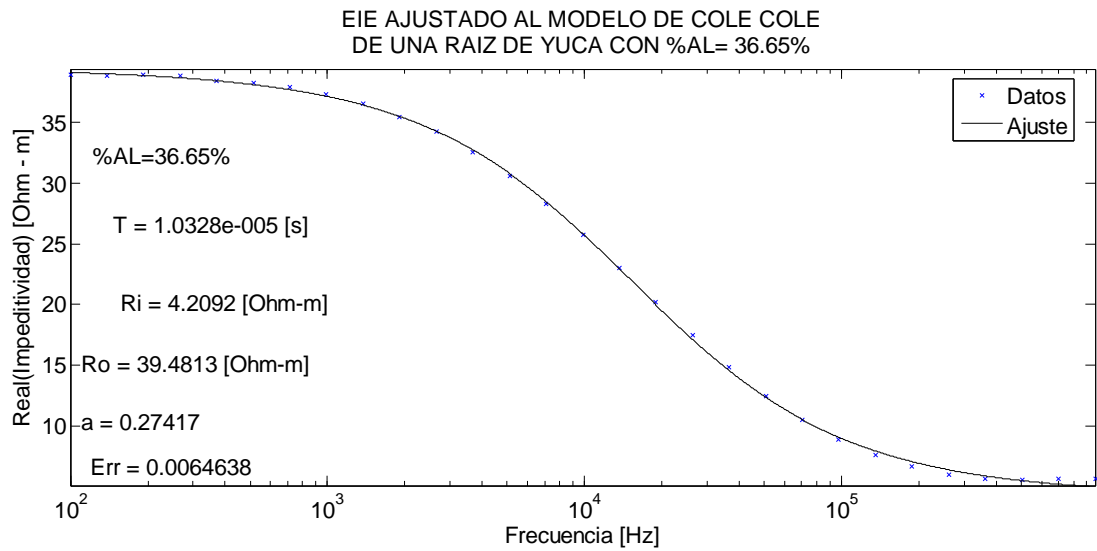
Fuente: Autor del Proyecto

Figura 54. Espectro de Impedancia Eléctrica ajustado al modelo de Cole Cole de una raíz con un contenido de almidón de 35.86%.



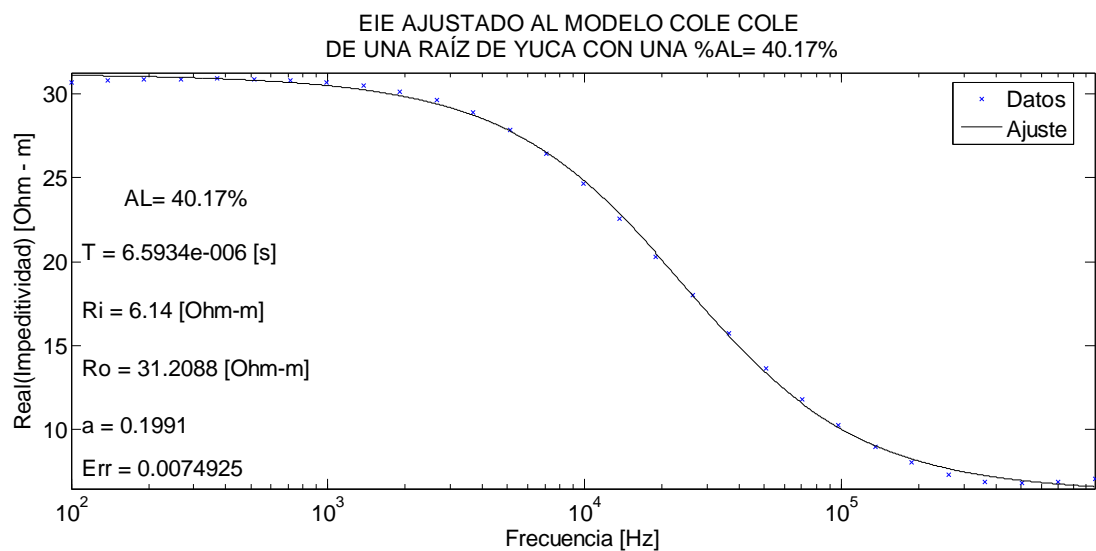
Fuente: Autor del Proyecto

Figura 55. Espectro de Impedancia Eléctrica ajustado al modelo de Cole Cole de una raíz con un contenido de almidón de 36.65%.



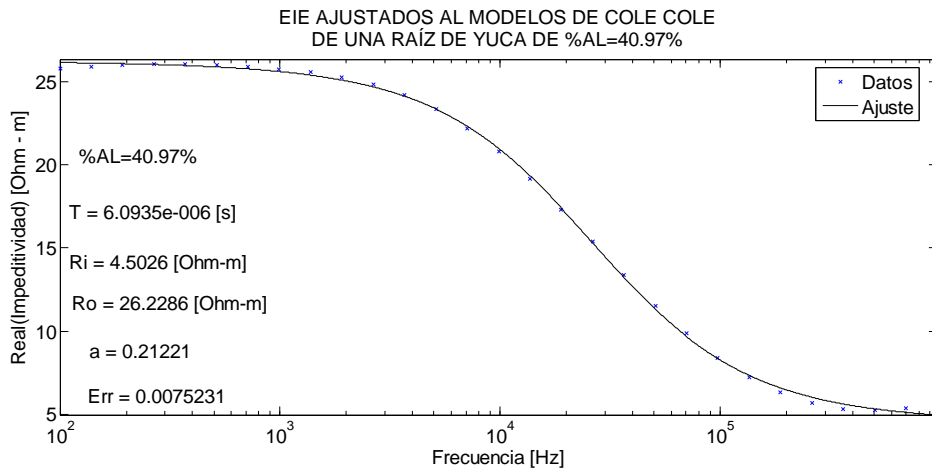
Fuente: Autor del Proyecto

Figura 56. Espectro de Impedancia Eléctrica ajustado al modelo de Cole Cole de una raíz con un contenido de almidón de 40.17%.



Fuente: Autor del Proyecto

Figura 57. Espectro de Impedancia Eléctrica ajustado al modelo de Cole Cole de una raíz con un contenido de almidón de 40.97%.



Fuente: Autor del Proyecto

Se puede notar en cada uno de los espectros, que los espectros de las 6 raíces seleccionadas se ajustan perfectamente al modelo de Cole Cole, con un error siempre inferior al 1%, lo cual garantiza un acertado análisis a partir de los parámetros de éste modelo.

En la tabla 10 se muestra ahora como varían los parámetros del modelo Cole – Cole respecto al %AL de las raíces analizadas con espectrofotometría;

notándose aumenta el %Al en la raíces de yuca su resistividad de baja frecuencias disminuye, pero con los demás parámetros del modelo Cole Cole no se logra definir como se relacionan unos con otros, es por eso que se considera la resistencia a baja frecuencias como la variable a relacionar con el %AL, así que retomando nuevamente el análisis con conductividad que se hizo con el almidón diluido en agua desmineralizada se tiene la regresión que se expone en la figura tiene la siguiente tabla que relaciona el %AL con la conductividad a baja frecuencia.

Tabla 10. Parámetros del modelo Cole - Cole de las raíces de yuca y sus respectivos valores de %AL.

YUCA	%AL	ρ_0 [Ohms-m]	ρ_∞ [Ohms-m]	a	τ (1e-5) [s1]	Conductividad (1/Ro) [S/m]
Y9_1	32.38%	59.04	5.36	21.71	1.21	0.016937
Y8_2	35.39%	49.4601	4.6387	0.22097	1.139	0.020218
Y7_4	35.86%	50.4338	5.0132	0.23164	1.2382	0.019827
Y8_3	36.65%	39.4813	4.2092	0.27417	1.0328	0.025328
Y6_2	40.17%	31.2088	6.14	0.1991	6.5934	0.032042
Y3_6	40.97%	26.2286	4.5026	0.21221	6.0935	0.038126

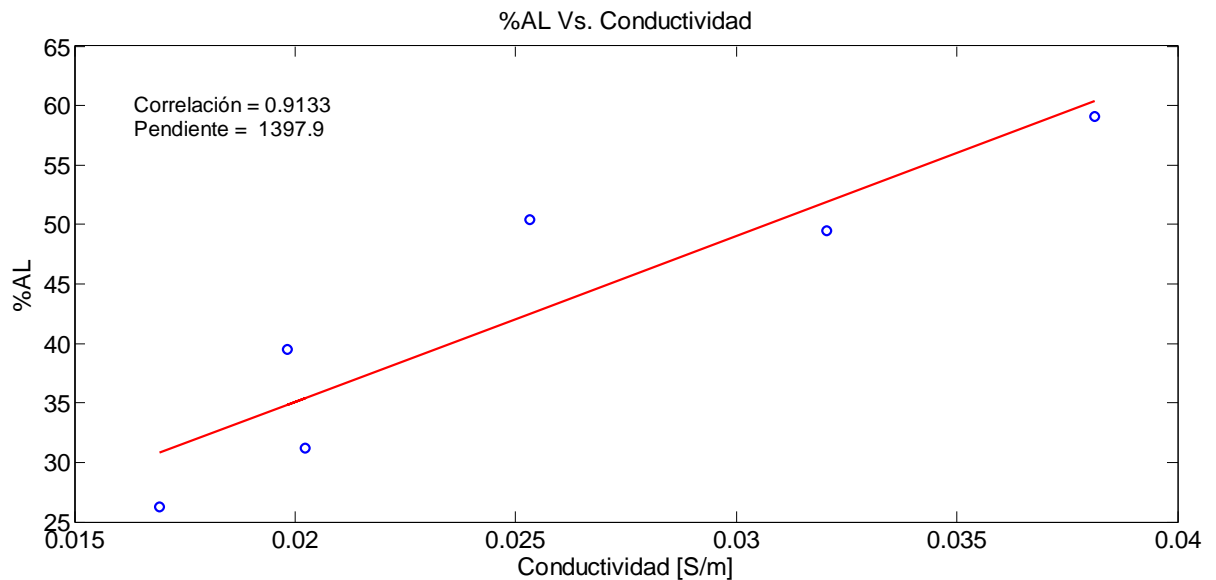
Fuente: Autor del Proyecto

Utilizando los comandos *corrcoef* y *polyfi* de Matlab se obtiene que existe una correlación de 0.9133 entre la conductividad de las raíces y su contenido de almidón.

La figura 54 muestra la esperada proporcionalidad directa entre la conductividad a bajas frecuencias de las raíces y sus respectivos contenidos de almidón, lo más alentador de éste resultado es que el valor de correlación es muy cercanos a los obtenidos con el conductivímetro diseñado por Samuel Jaimes y que se utilizó para las pruebas preliminares con el almidón diluido en agua desmineralizada, indicando que con una pequeña modificación a éste dispositivo sería la mejor opción para la medición del contenido de almidón en

raíces de yuca fresca entre los equipos diseñados por el grupo CIMBIOS de la UIS.

Figura 58. Regresión lineal Entre el porcentaje de almidón y el contenido de materia seca en raíces de yuca fresca.



Fuente: Autor del Proyecto

Aunque se necesitan hacer muchas más pruebas tomando como referente de comparación los resultados espectrofotométricos y no los de Gravedad específica, se puede decir que la siguiente sería la expresión matemática que relacionaría el contenido de almidón y la su conductividad eléctrica.

$$\%AL = 1397.9 * \sigma + 7.1 [\%]$$

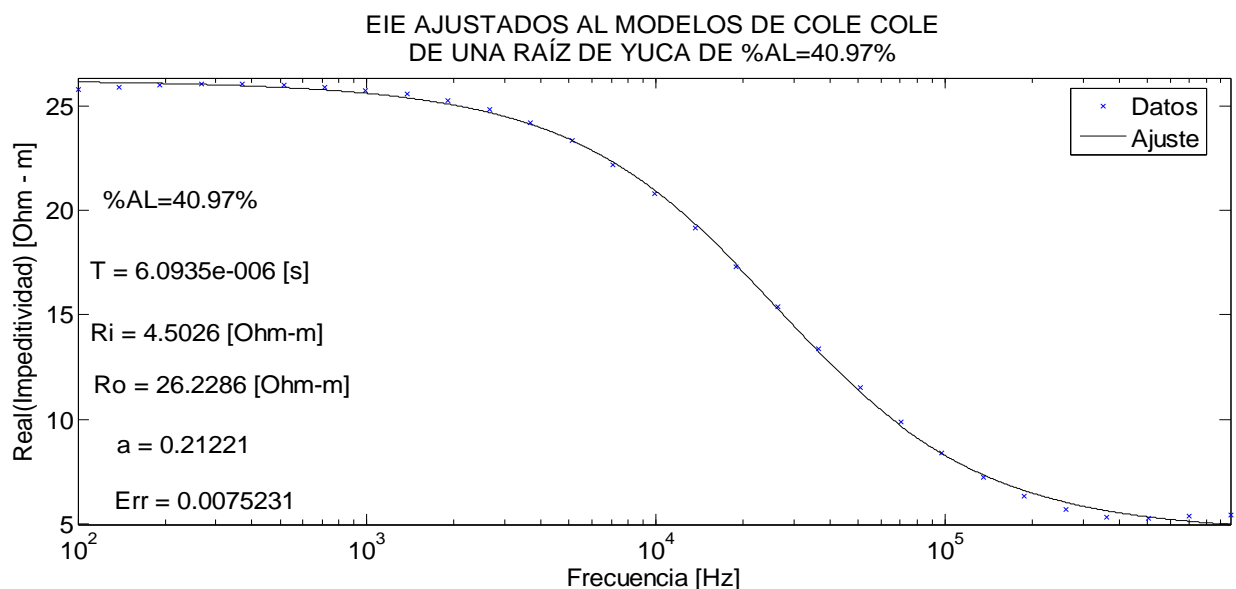
4. BASE DE DATOS

La base de datos se esquematiza con los formatos de toma de medidas, donde se encuentran toda la información relacionada con cada una de las raíces y las respectivas muestras para el método de gravedad específica a las que pertenecieron, además cada raíz contará con sus respectivo espectro ajustado al modelo de COLE COLE. A continuación se muestra como se presentara la base de datos, la cual se encuentra en el anexo B.

Figura 59. Esquema de la base de datos de las 104 raíces con sus respectivos espectros ajustados al modelo Cole Cole e información relacionada a las muestras.

No Muestra (Peso Total de la muestra):	Muestra No 7 (2780 gr)						
GE [%](Para toda la muestra):	37.56%AL						
ARCHIVO IM6	y7310	y7316	y7313r	y7315	y7317	y7318	y7319
Ro [Ohms-m]	37.131	53.952	26.343	50.434	51.0076	30.262	25.754
PESO [gr]:	710	420	360	190	500	270	290
Serie de Identificación	Y7_1	Y7_2	Y7_3	Y7_4	Y7_5	Y7_6	Y7_8
%AL por Espectrofotometría				35.86%			

No Muestra (Peso Total de la muestra):	Muestra No 8 (3200 gr)					
GE [%](Para toda la muestra):	35.64%					
ARCHIVO IM6	y73120	y73121	y7322	y7323	y7325	y7326
Ro [Ohms-m]	45.148	49.4601	39.481	40.962	34.688	55.688
PESO [gr]:	600	550	470	340	570	650
Serie de Identificación	Y8_1	Y8_2	Y8_3	Y8_4	Y8_5	Y8_6
%AL por Espectrofotometría	ESPF:	35.39%	36.65%			



5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en éste trabajo de investigación muestra la viabilidad de iniciar una investigación más profunda para fortalecer los resultados de ésta investigación, tomando como referencia los resultados espectrofotométricos y no los de Gravedad específica, ya que éste último no da información precisa del %AL de cada una de las raíces sino de las muestra en general, debido que al aplicarlo se supone igualdad de condiciones para las raíces, lo cual parece ser falso, porque inclusive se sabe que en diferentes partes de la raíz el contenido de almidón es diferente.

Además se cuenta ya con equipos diseñados en el grupo de Investigación CIMBIOS que serían herramientas fundamentales para continuar con la investigación, equipos como el MIMP08 (Barrera V, Canova J, 2008), el cual hace mediciones bipolar en la zona de dispersión beta. Sin embargo con los resultados obtenidos, el equipo diseñado en la tesis de grado de Samuel Jaimes, puede modificarse para medir las conductividades de las raíces de yuca con el método de Van Der Pauw, éste dispositivo cuenta con un diseño económico y práctico, además la frecuencia de 2Khz a la que éste equipo excita las muestras mostró estar en el rango de las frecuencia ideales para la determinación de %AL.

Cabe anotar también que los valores de pendientes y correlación que se obtuvieron para las pruebas de almidón diluido en agua desmineralizada son del mismo orden que el de las raíces, lo que muestra que el intento de emular el comportamiento de la raíz con este procedimiento es válido, e incluso su comportamiento eléctrico podría justificarse de igual manera con la teoría de partículas esféricas en suspensión.

Por otro lado, La escases de alimentos que está empezando a azotar al mundo, debido a que las tierras que antes se dedicaban al cultivo de alimentos, ahora se están empezando a dedicar a cultivos para la obtención de biocombustibles. Es por eso que es necesario optimizar desde el mismo cultivo todo el proceso para la elaboración de biocombustibles, y es aquí donde éste proyecto quiere llegar. Se ha iniciado una investigación que ha logrado caracterizar el producto final de un cultivo de yuca, la raíz, el paso siguiente es consolidar ésta técnica de caracterización para luego relacionarla con las propiedades eléctricas de los tejidos de otras partes de las plantas, como el tallo por ejemplo, lo que facilitaría el estudio de señales vegetales en cultivos, que permitan modelar su comportamiento y hacer diagnósticos como se ha logrado hacer a nivel de medicina en los humanos. Estas sería una herramienta fundamental para lograr mayor eficiencia en los cultivos de una manera 100% natural y sin manipulación genética, partiendo de que se podría analizar cómo se adaptan determinadas clases de cultivos a los diferentes tipos de suelos climas, plagas, etc.

Por todas las razones anteriores, La Universidad Industrial de Santander, y en particular la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y telecomunicaciones debe establecer políticas de formación en investigación, estimulando la generación de tecnología que generen un verdadero impacto en nuestra sociedad colombiana, comprometiendo a todos y a cada uno de los docentes y estudiantes para que la Universidad cumpla su razón de ser, que es investigar para que la sociedad cuente con una mejor calidad de vida; se podría contar entonces con la tecnología necesaria para crear normas de regulación de cultivos para la obtención de biocombustibles.

6. RECOMENDACIONES

La recomendación más importante para la continuación de éste proyecto es contar con las pruebas químicas para corroborar las medidas eléctricas, para ellos debe gestionarse con una empresa del sector agropecuario, con el Estado ó con la misma Universidad un patrocinio para que supla los gastos que éstos procedimientos químicos requieren.

No debe usarse el método de gravedad Especifica para correlacionar los resultados de %AL, con los de los parámetros del modelo de Cole-Cole, ya que éste método asume un valor grupal del %AL y no particularizado como se pretende estudiar con las medidas eléctricas.

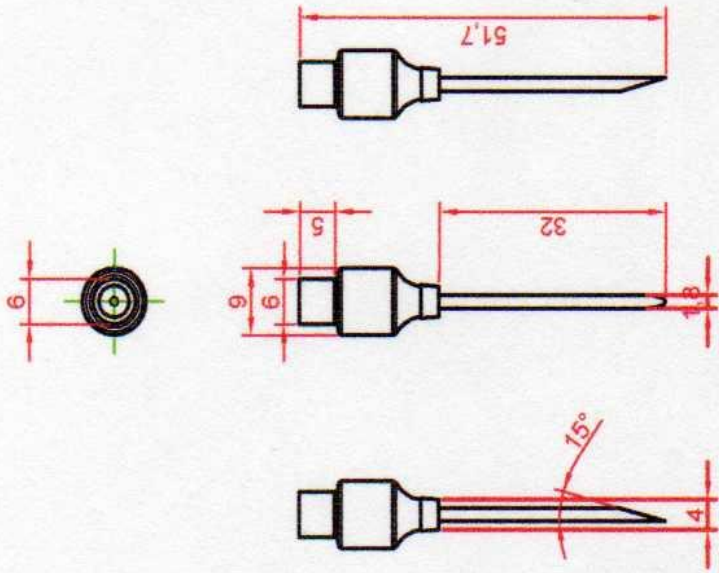
También, deben vincularse a biólogos e Ingenieros Agroindustriales para iniciar la metodología para emplear este tipo de tecnologías teniendo en cuenta las necesidades y exigencias que tiene el trabajo en el campo.

BIBLIOGRAFÍA

- Ackmann. James J. Methods of Complex Impedance Measurements in Biologic Tissue. 18th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Vol. 18, 1984. pp 281-311.
- Aponte Carrillo, Gretty Paola. Caro Torres, Julio Cibel. Medición de espectro de impedancia eléctrica de tejido cervicouterino sano y displásico in-vitro. Segunda fase. Tesis de Maestría. Universidad Industrial de Santander. 2005.
- Bott W, Adrian. Electrochemical Impedance Spectroscopy Usin the BAS-Zahner IM6 and IM6e Impedance Analyzers. Bioanalytical Systems, Inc. West Lafayette.
- Brown B., Milnes P, Abdul S et al. Detection of cervical intraepithelial neoplasia using impedance spectroscopy: a prospective study, BJOG-An International Journal of Obstetrics and Gynecology, 112 (6): 802-806 June 2005.
- Bustamante Hernández. Luís Fernando. Martínez Duarte, Claudia Marcela. Diseño e implementación de un impedanciometro para caracterización no destructiva de sólidos porosos. Tesis de Pregrado. Universidad Industrial de Santander. 2007.
- Buzzell P., Pintauro S. Bioelectric Impedance Analysis. Department of nutrition and food sciences, university of Vermont. <http://nutrition.uvm.edu/bodycomp/bia/>.
- Celis Campos, Johanna Andrea. Jara Mora, Jenny Andrea. Tanatocronodiagnóstico en humanos basado en espectroscopia de impedancia eléctrica, primera fase. Tesis de Pregrado en elaboración. Universidad Industrial de Santander. (Material sin publicar).
- DOMINGUEZ, Carlos. YUCA: Investigación, Producción y Utilización. Centro Internacional de Agricultura Tropical, CIAT. Cali, 1983.
- García Peñalver, Laura. Detección rápida de actividad mutagénica en procariotas por impedancia eléctrica. Universidad Santiago de Compostela, facultad de farmacia e instituto de investigación y análisis alimentarios. 2001.
- Grimnes S. y Martinsen O. Bioimpedance and Bioelectricity Basics. Great Britain: Academic Press. 2000.
- Ivorra A., Aguiló J., Millán J. Design considerations for optimum impedance probes with planar electrodes for bioimpedance measurements , Proceedings of 24th

International Semiconductor Conference, Sinaia (Romany), vol. 1, 269-272, October 9-13, 2001.

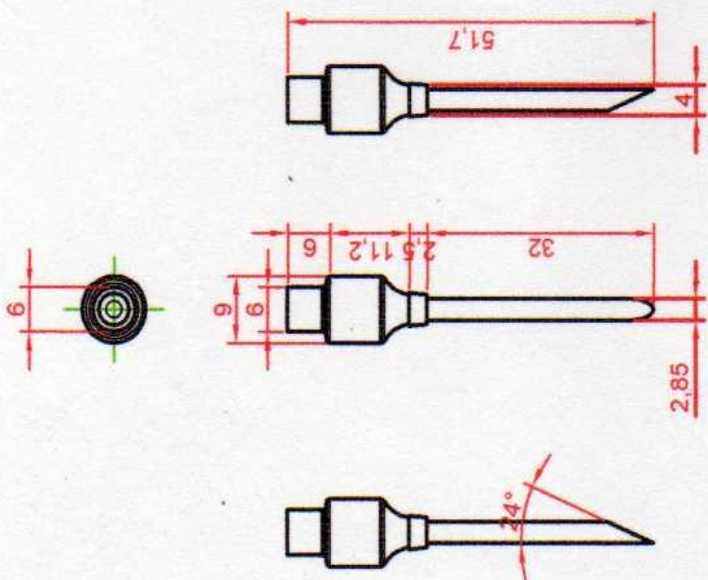
- Jaimes, Samuel. Valencia, Juan. Diseño de un medidor de conductividad eléctrica de soluciones salinas, haciendo uso de una celda de conductancia calculable, para la calibración de una sonda tetrapolar utilizada en la medición de impedancia eléctrica en tejido humano. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander 2006.
- Miranda, David, Barrero Jaime. Echeverri Jorge. Estudio para la detección temprana del cancer de cuello uterino. Bucaramanga: Sic Editorial, 2007. p 127.
- Miranda, David. López, Adam. Determination of Cole-Cole parameters using only the real part of electrical impedivity measurements. IOP, electronic journals. 2008.
- Nebuya S, Brown B, Smallwood R, Milnes P, Watterworth A, Noshiri M. Measurement of high frequency electrical transfer impedances from biological tissues". Electronics Letters. Vol. 35 No 23, November 1999.
- Omoaka.P.O.E; ProfT, M de; Popma, F. Assessment of ripening in bananas using electrical impedance spectroscopy. Postharvest News and Information (GBR), 9, (3), p. 35N-38N. 1998.
- Ospina, Bernardo. Cevallos, Hernán. La Yuca en el Tercer Milenio: Sistemas modernos de producción, procesamiento, utilización y comercialización. Publicación en línea <http://www.ciat.cgiar.org/es/descargar/Inicio.htm> Cali, 2002. Última visita 17 de Agosto del 2007.
- Rigaud B, Morucci J,,Chauveau N. Bioelectrical Impedance Techniques in Medicine, Part I. Bioimpedance Measurement, Second Section: Impedance Spectrometry". Natshvile: Editorial Advisory Board, Critical Review in Biomedical Engineering Vol. 24 Issues 4-6 1996. p.257-351.
- Rosell, J., Colominas, J., Riu, P., Pallas-Areny, R. and Webster, J.G. Skin impedance from 1 Hz to 1 MHz. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 35, 649-651. 1988.
- Schwan, Hernan P. Electrical Properties of Tissue and Cell Suspensions. División de electromedicina, escuela Moore de Ingeniería eléctrica y departamento de Medicina Física y Rehabilitación, Escuela de Medicina. Universidad de Pensilvania, Filadelfia, 1957. pp. 147-209.



PIEZA NO 4

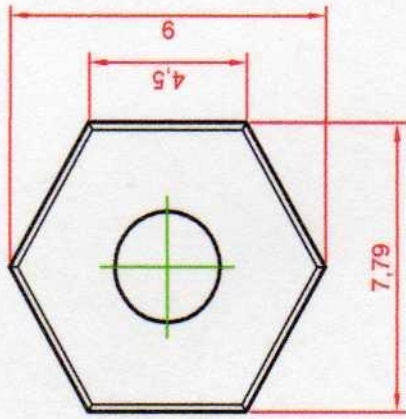
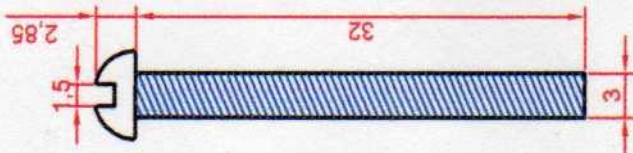
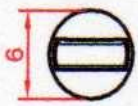
ESC 1:1

Unidades en mm



PIEZA NO 3

ESC 1:1



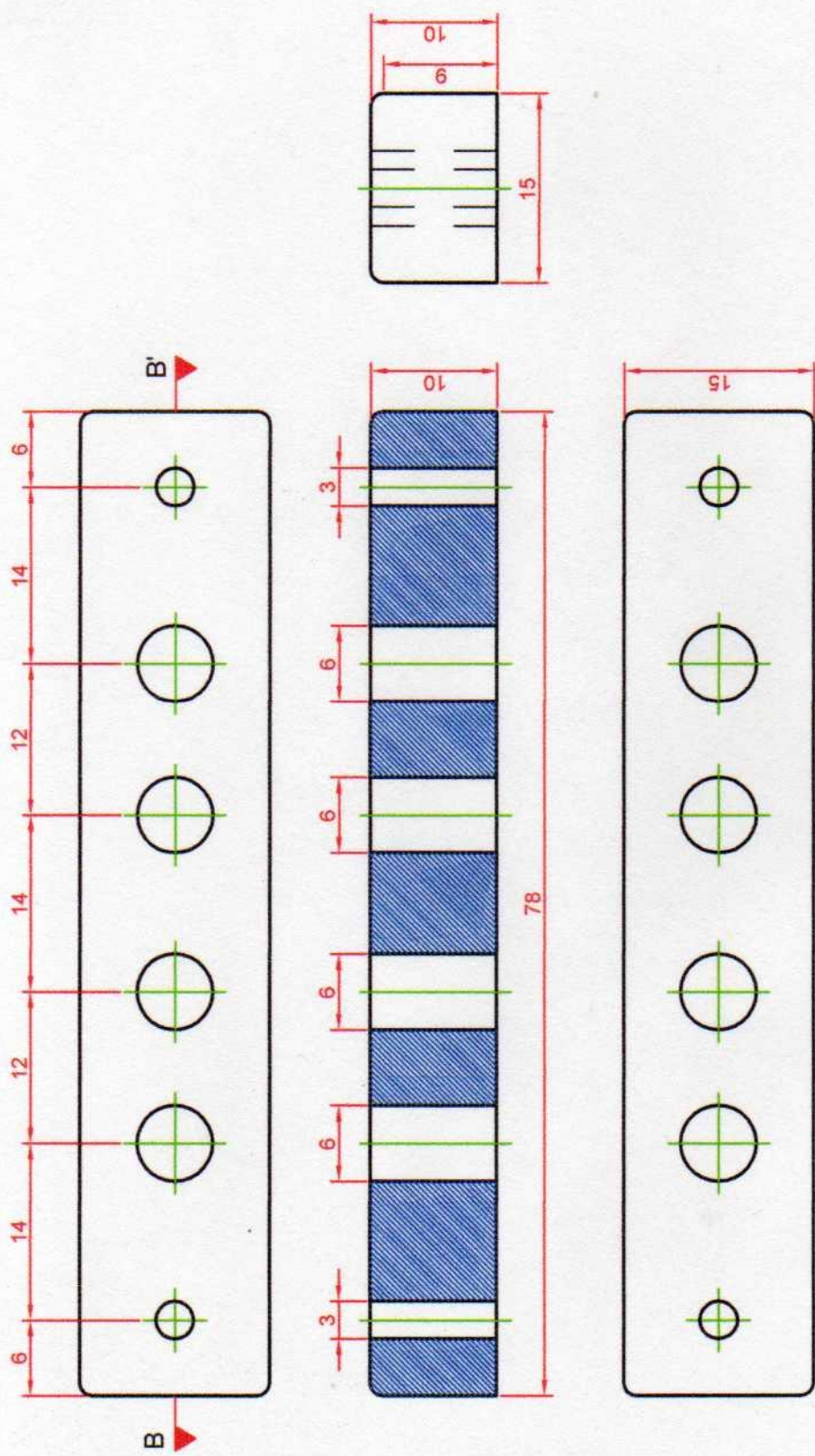
PIEZA NO 5

ESC 2:1

PIEZA NO 6

ESC 5:1

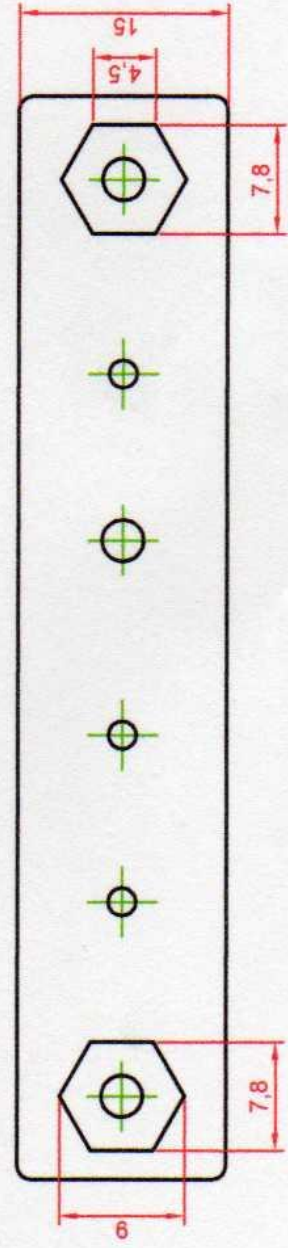
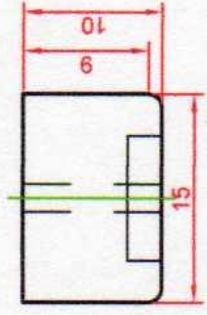
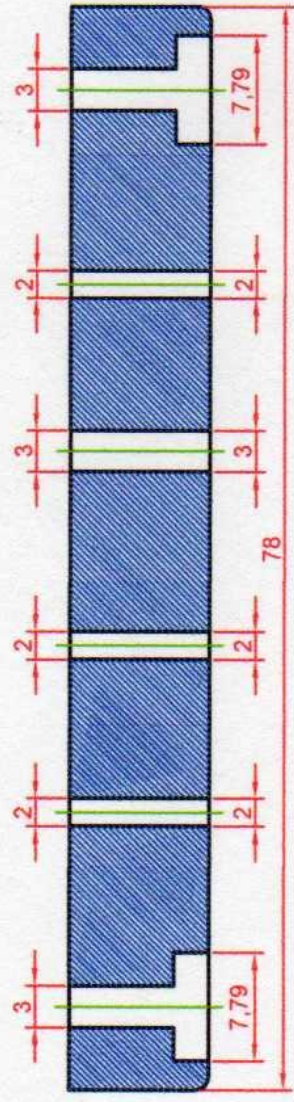
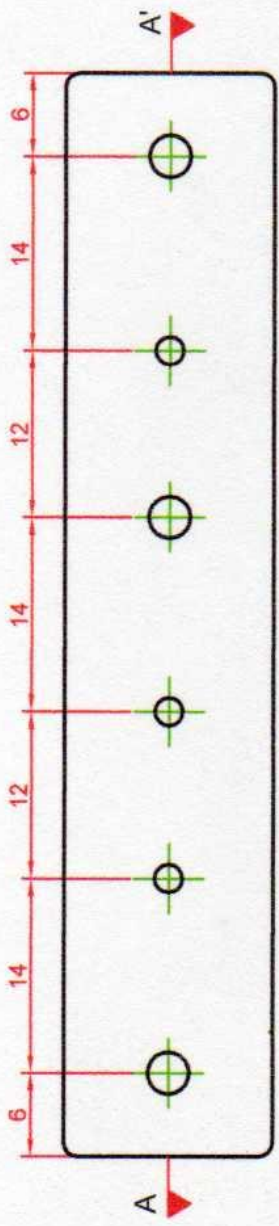
Unidades en mm



PIEZA No 2

ESC 2:1

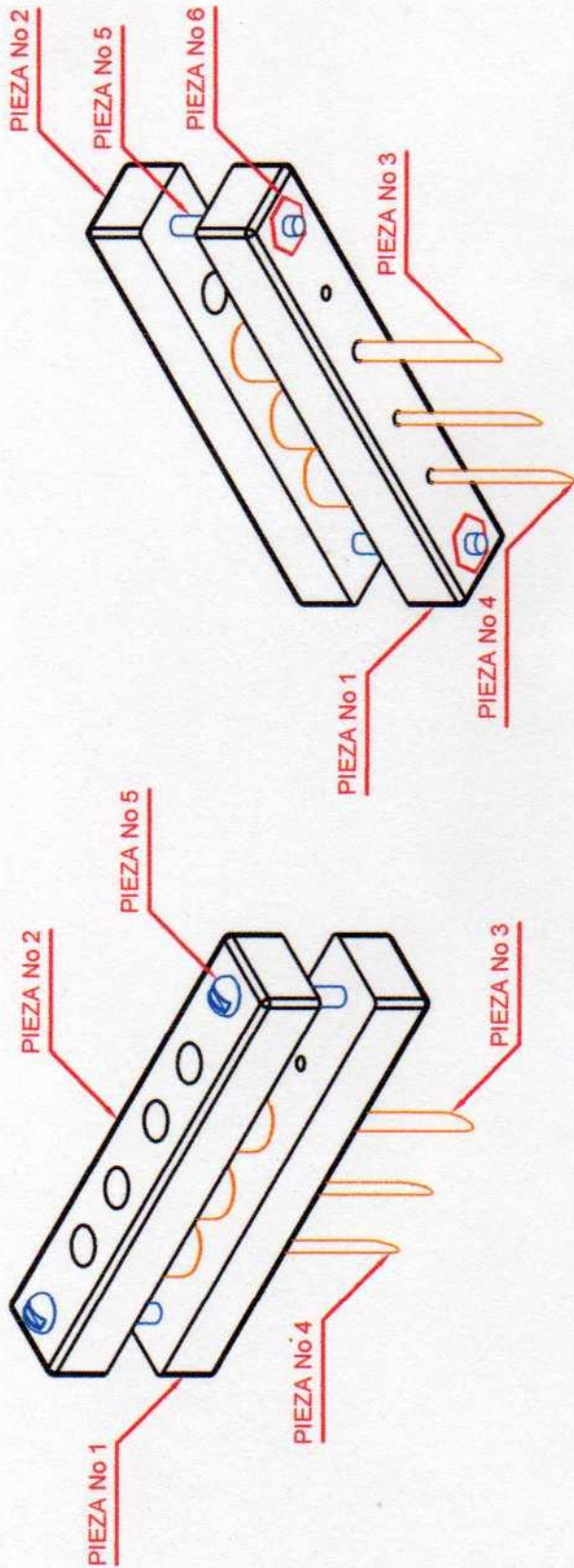
Unidades en mm



PIEZA NO 1

ESC 2:1

Unidades en mm

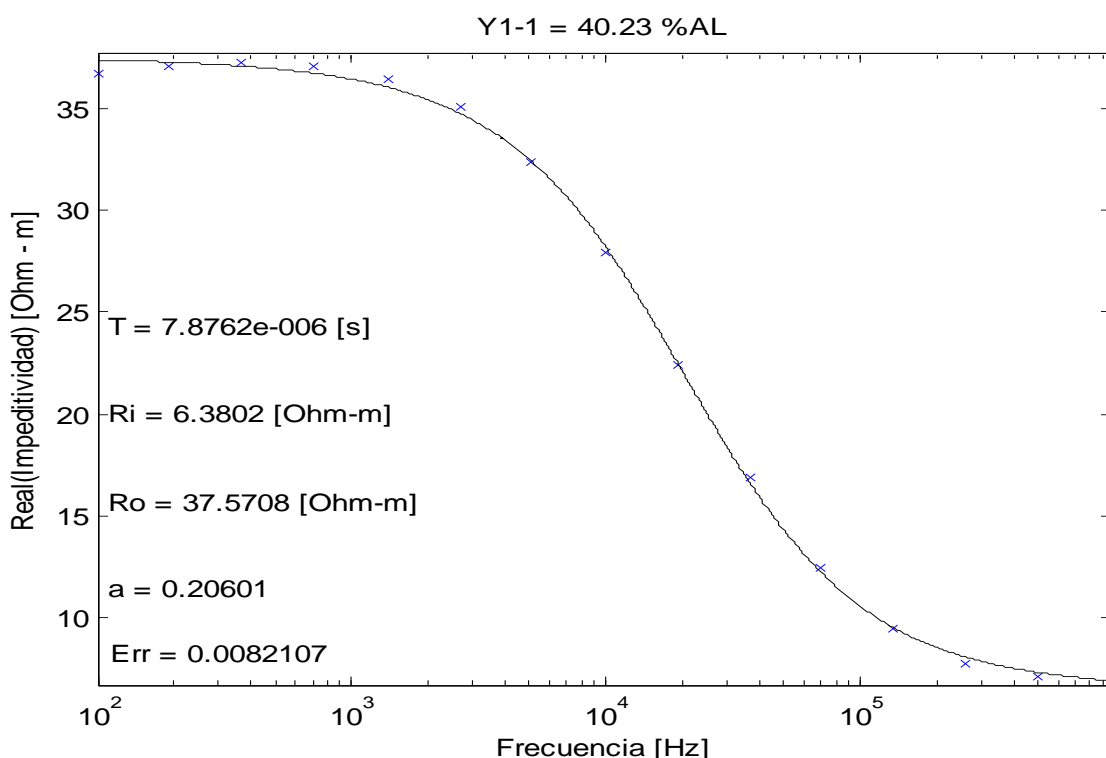


PIEZA	NOMBRE	CANT	MATERIAL	OBSERVACIONES
6	TUERCA	2	ACERO 1060	
5	TORNILLO	2	ACERO 1060	
4	ELECTRODO	2	ACERO QUIRURGICO	
3	ELECTRODO	1	ACERO QUIRURGICO	
2	SOPORTE SUPERIOR	1	TEFLÓN	
1	SOPORTE INFERIOR	1	TEFLÓN	
FECHA: ABR / 2008 DIBUJÓ: ALBERTO ELIAS ALVAREZ ALVAREZ COMPROBÓ: ING. DAVID ALEJANDRO MIRANDA MERCADO NORMA: ISO [mm]		UIS		ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA, ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO - MECANICAS
ESC: INDICADAS	MEDICIÓN DEL CONTENIDO DE ALMIDÓN Y PORCENTAJE DE MATERIA SECA EN RAICES DE YUCA FRESCA BASADO EN ESPECTROSCOPÍA DE IMPEDANCIA ELECTRICA			
CODIGO: 2030729	PROYECTO DE GRADO			PLANO 6 DE 6

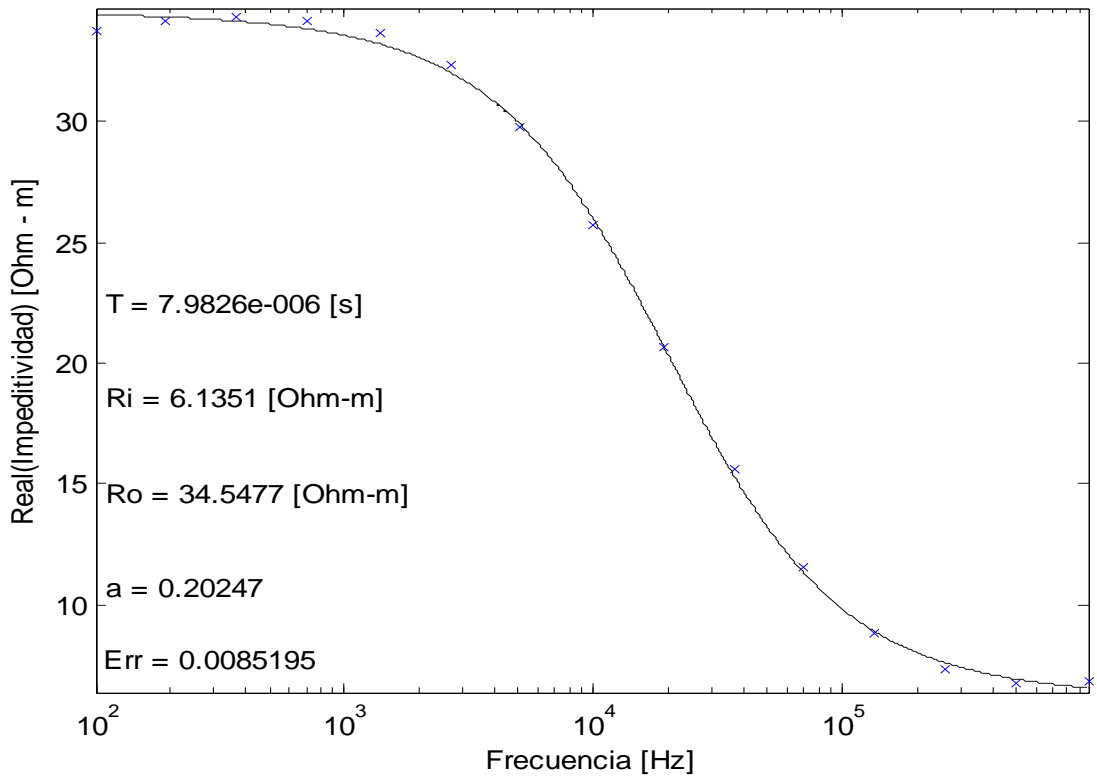
ANEXO B. BASE DE DATOS DE LAS 104 RAÍCES ANALIZADAS EN EL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

La base de datos se encuentra organizada en 15 muestras, donde cada muestra correspon al grupo de raíces que se utilizó para calcular el contenido de almidón a travez del método de gravedad especifica, también aparece un espacio para los resultados de los análisis de espectrofotometría, el peso de cada raíz, la serie con que se identifica cada espectro de la raíz, la resistencia en baja frecuencia según el modelo de Cole- Cole y el nombre del archivo donde se guardo en el computador del analizador de espectros BAS ZAHNER IM6.

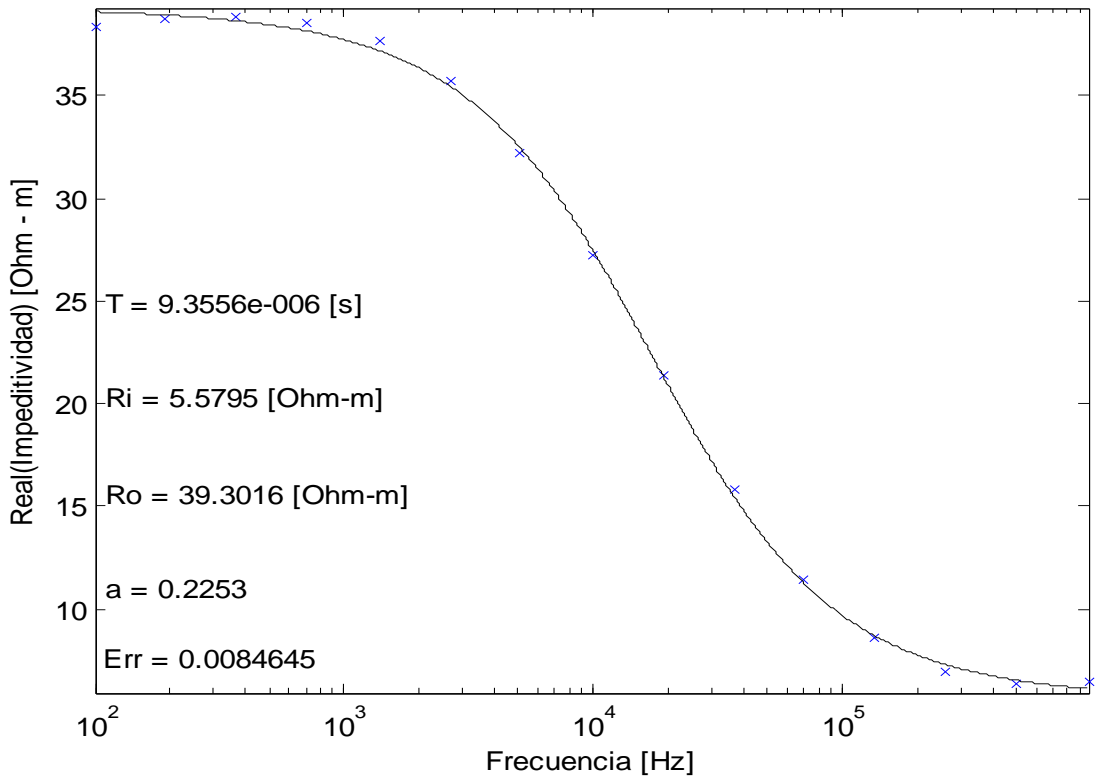
No Muestra (Peso Total de la muestra):	Muestra No 1 (2740 gr)						
GE [%](Para toda la muestra):	GE%AL = 40.23%						
ARCHIVO IM6	5301ee	y5301e2	y5302ee	y5302e2	y5302	y5303	y5304
Ro [Ohm-m]	37.57	34.5477	39.3016	39.6591	24.9523	22.7317	33.599
PESO [gr]:	200	350	540	420	210	560	440
Serie de Identificación	Y1_1	Y1_2	Y1_3	Y1_4	Y1_5	Y1_6	Y1_7
%AL por Espectrofotometría							

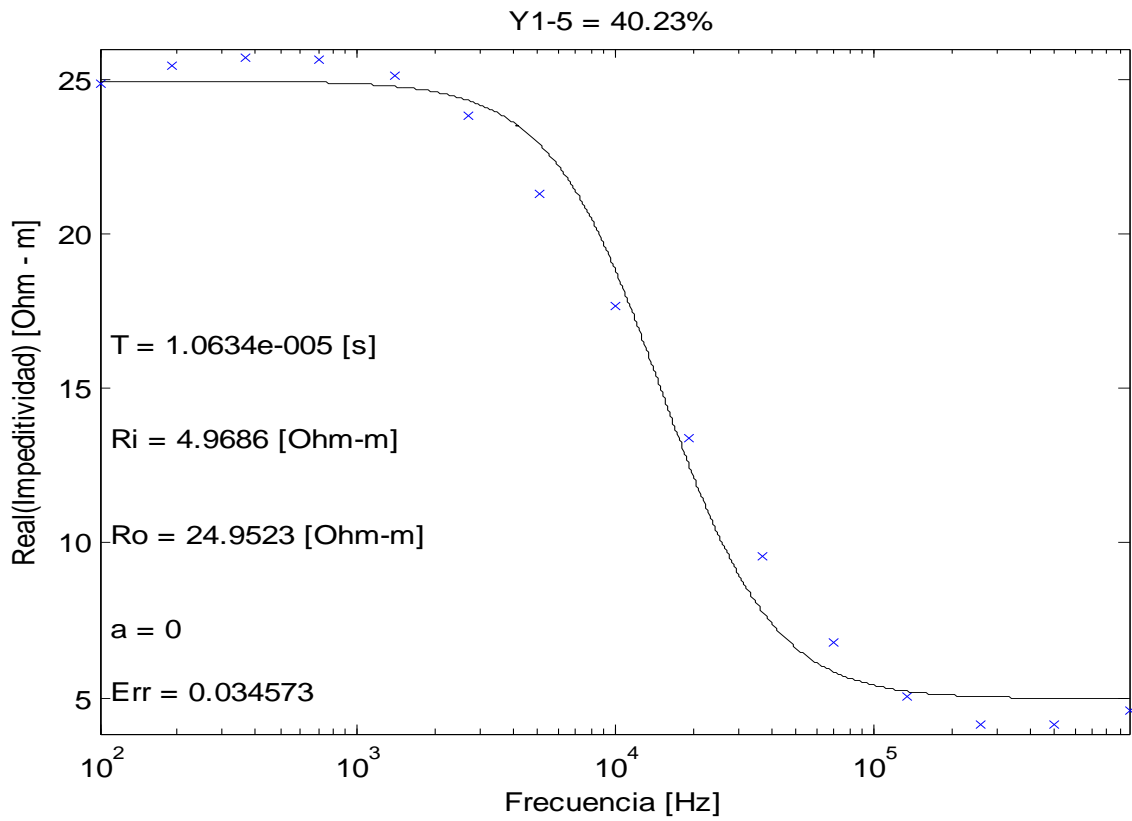
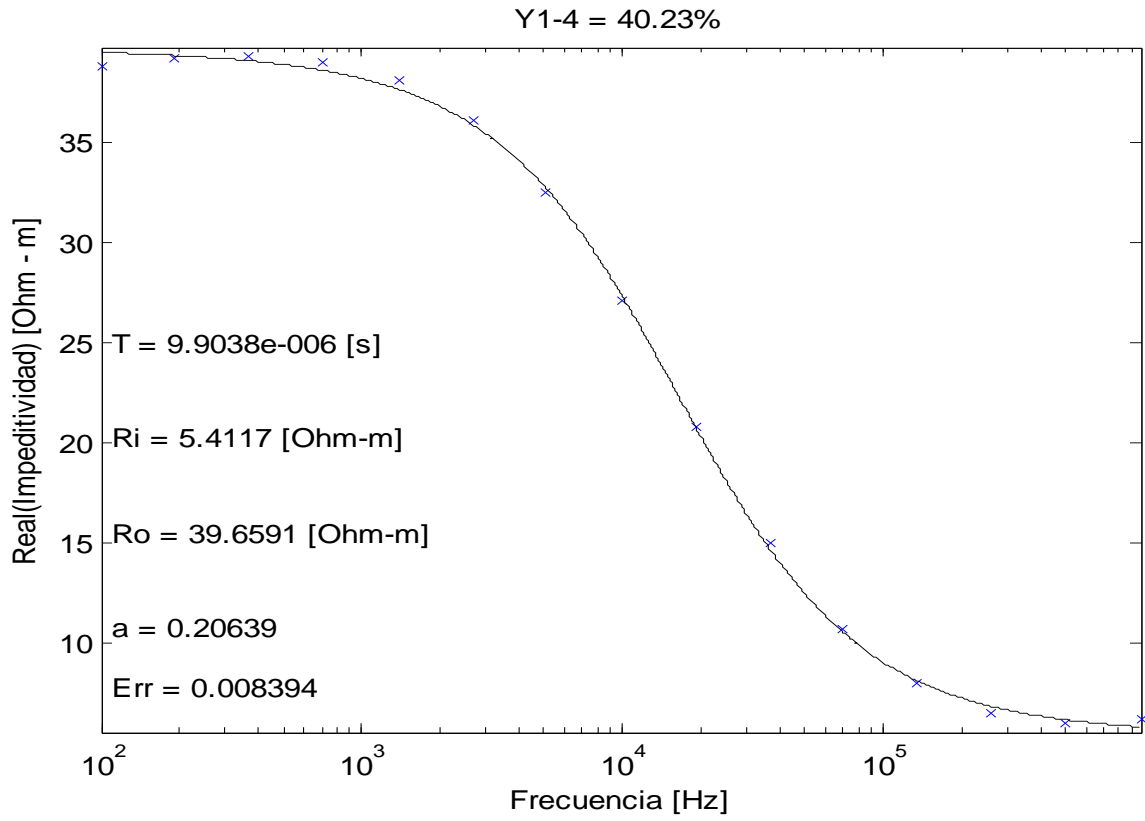


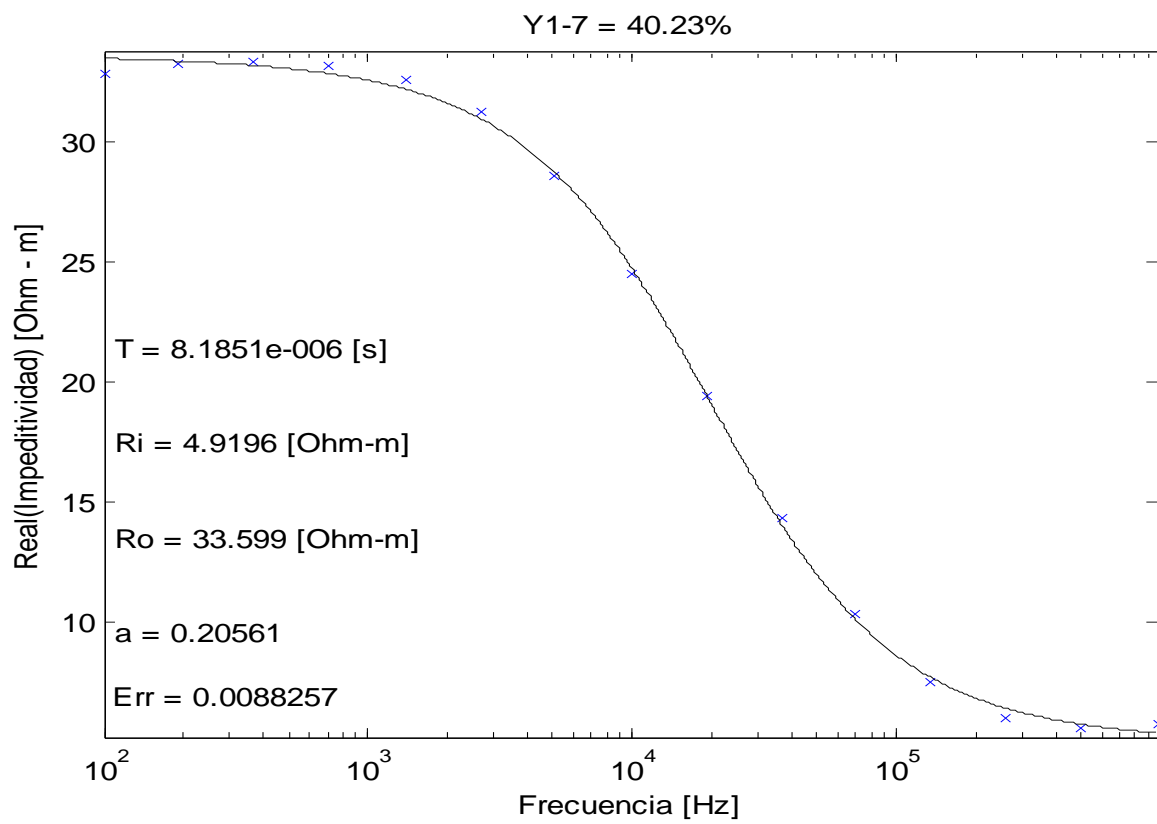
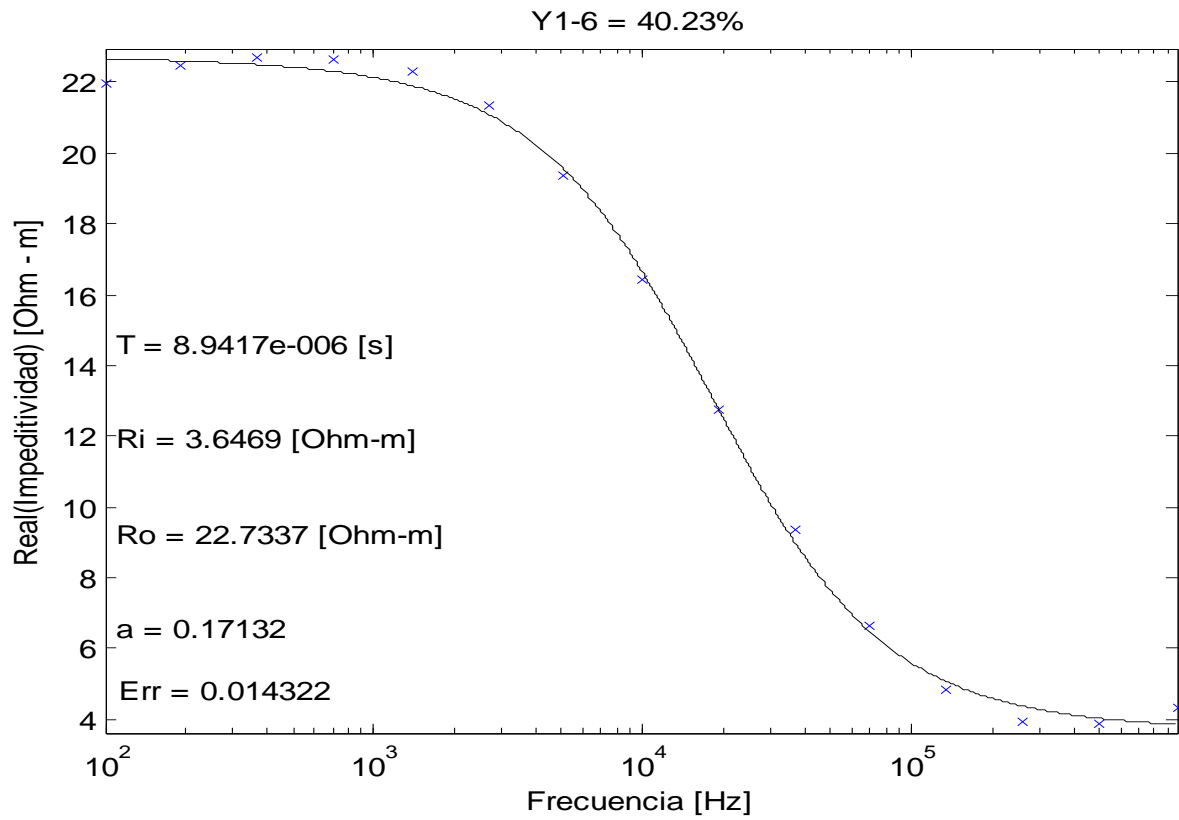
Y1-2 = 40.23%



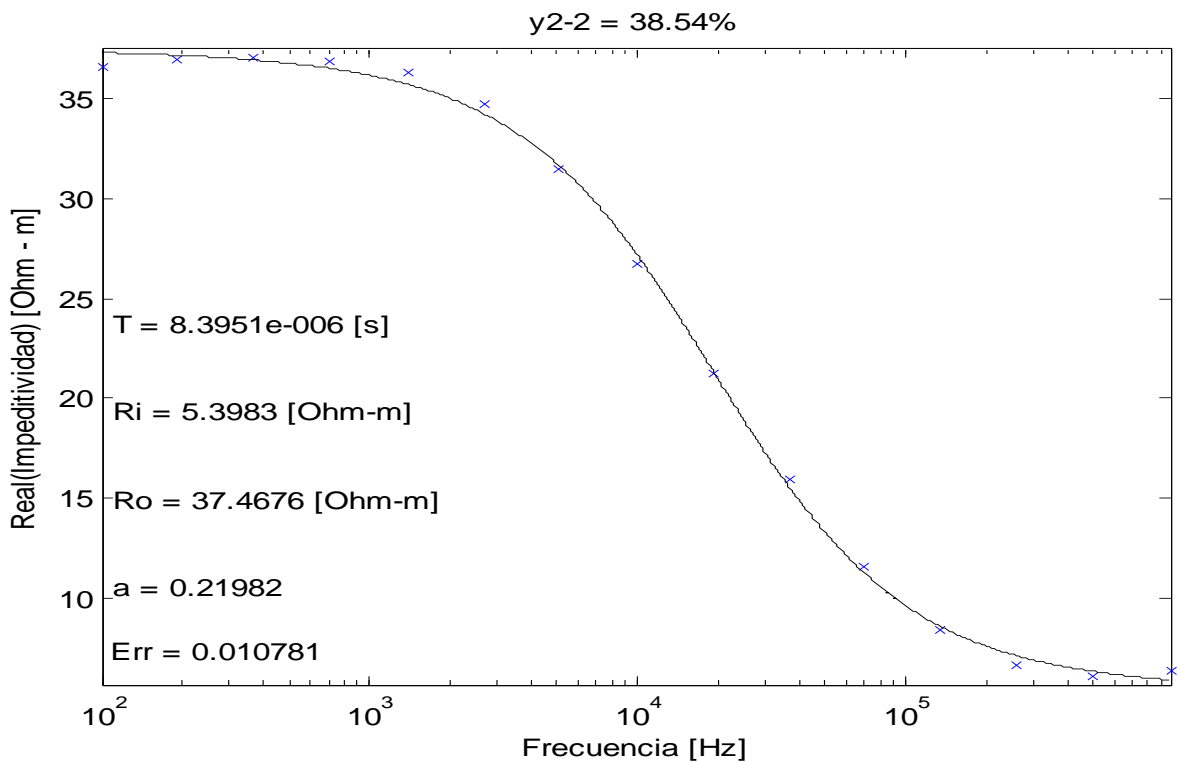
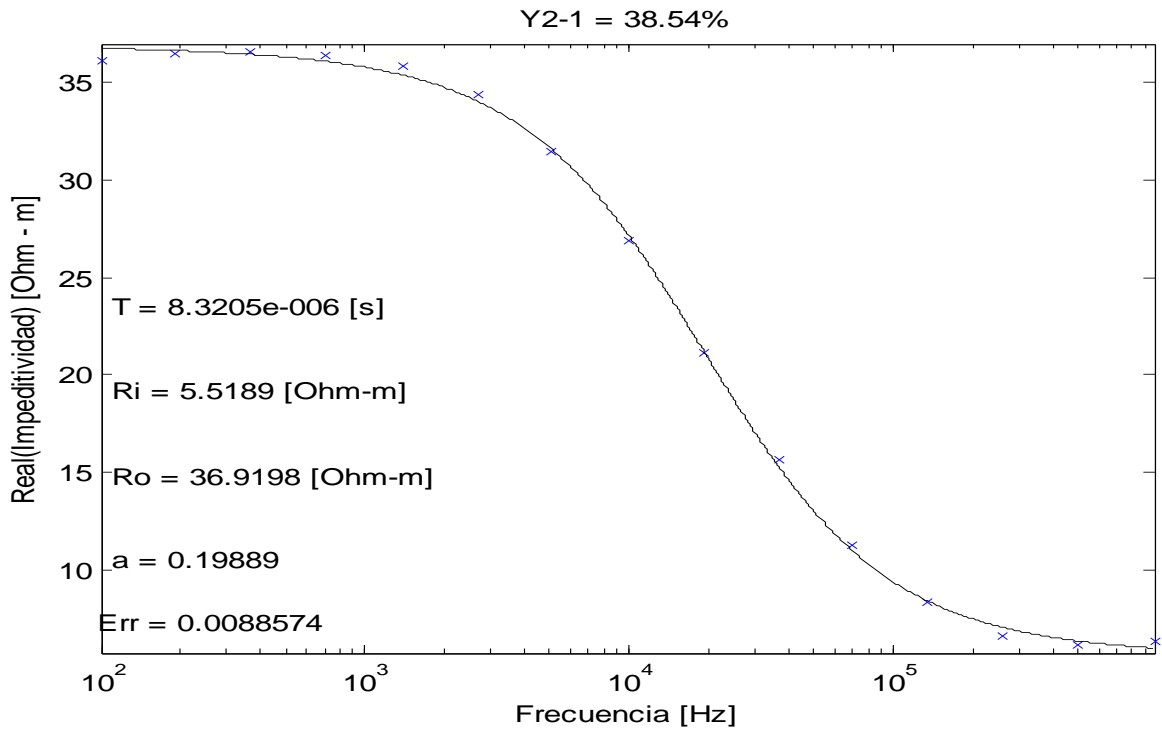
y1-3 = 40.23%

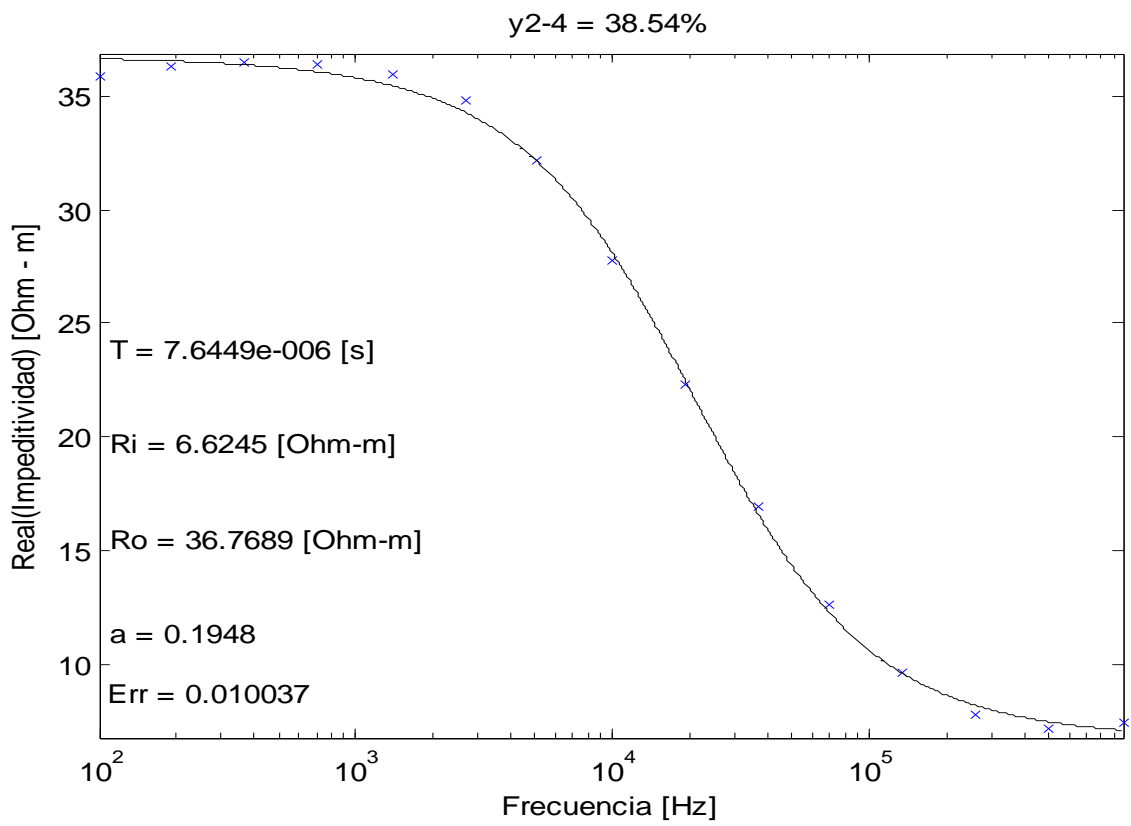
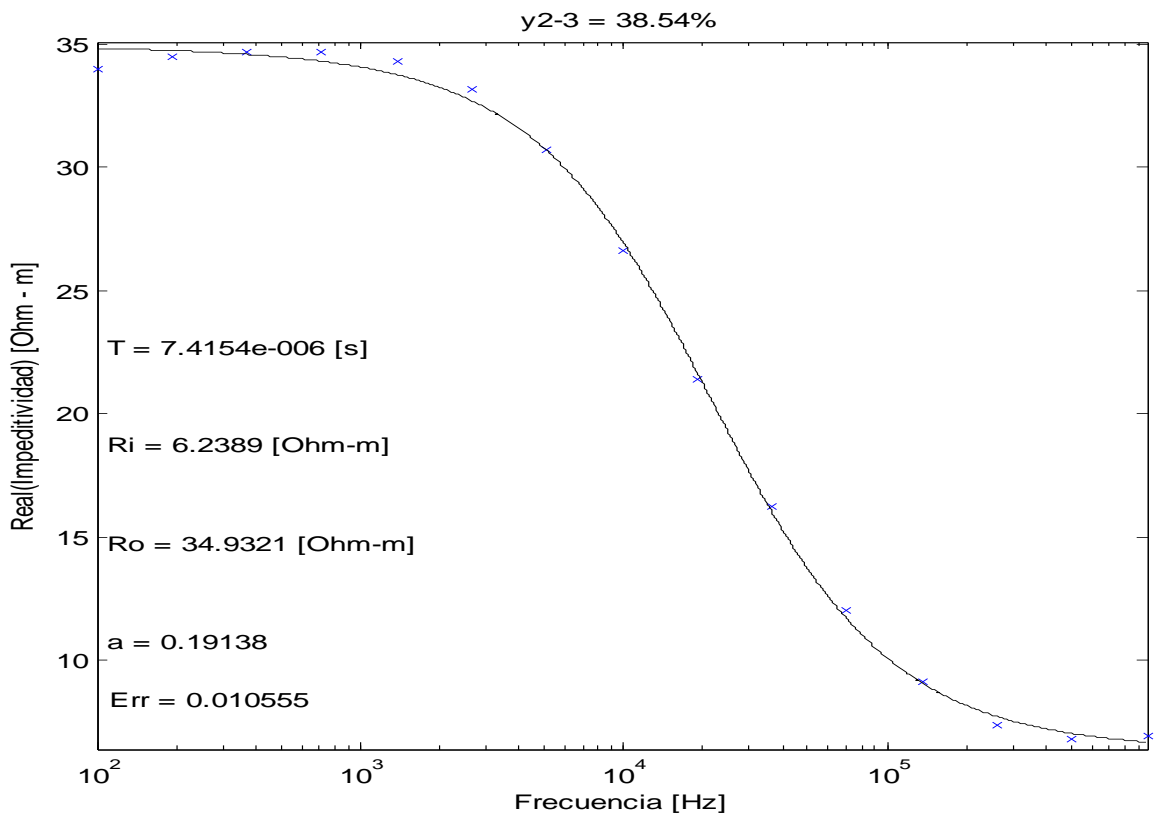


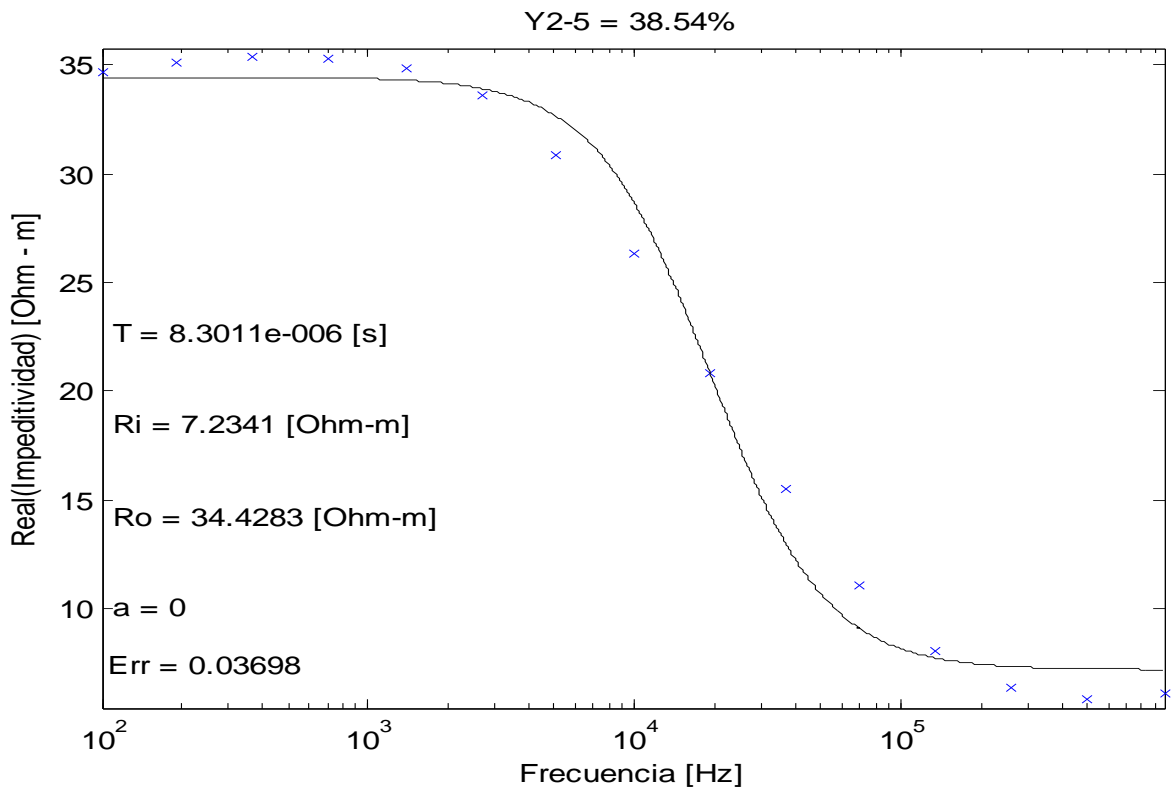




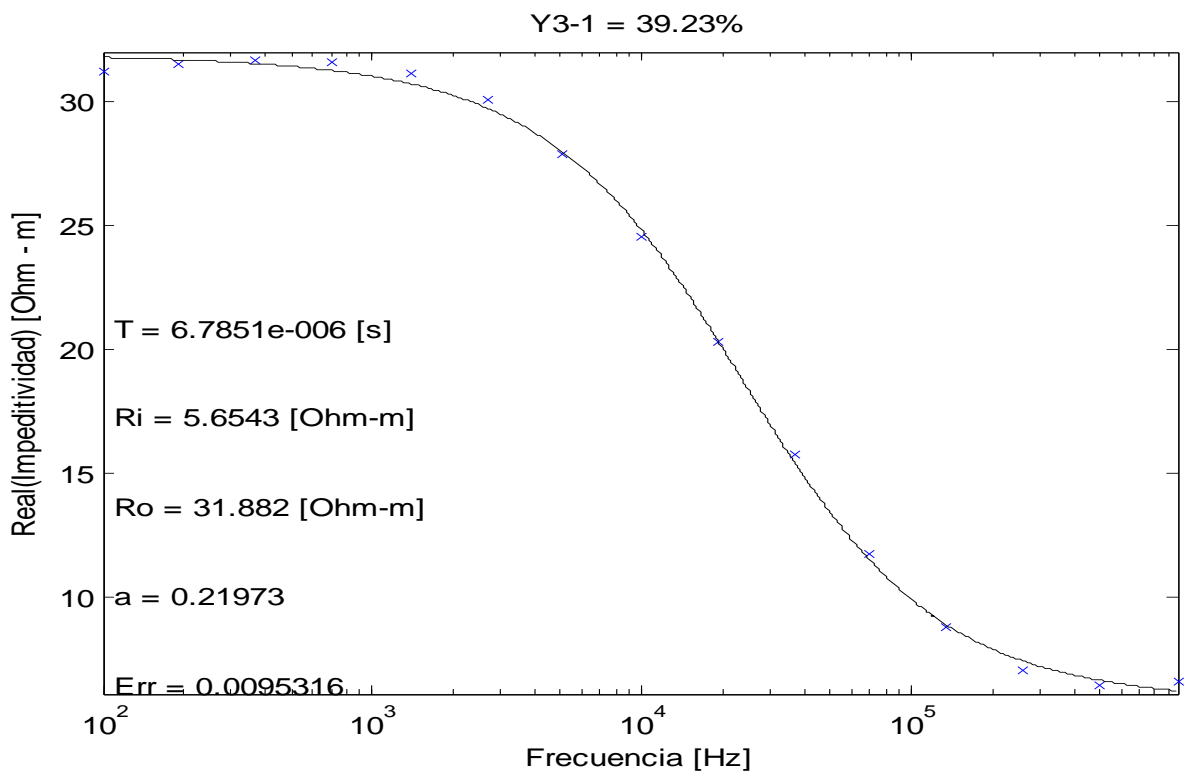
No Muestra (Peso Total de la muestra):	Muestra No 2 (2410 gr)				
GE [%](Para toda la muestra):	38.54%				
ARCHIVO IM6	y5305	y5306	y5310	y5311	y5312
Ro [Ohms-m]	36.9198	37.4676	34.9321	36.7689	34.4283
PESO [gr]:	650	380	420	400	550
Serie de Identificación	Y2_1	Y2_2	Y2_3	Y2_4	Y2_5
%AL por Espectrofotometría					

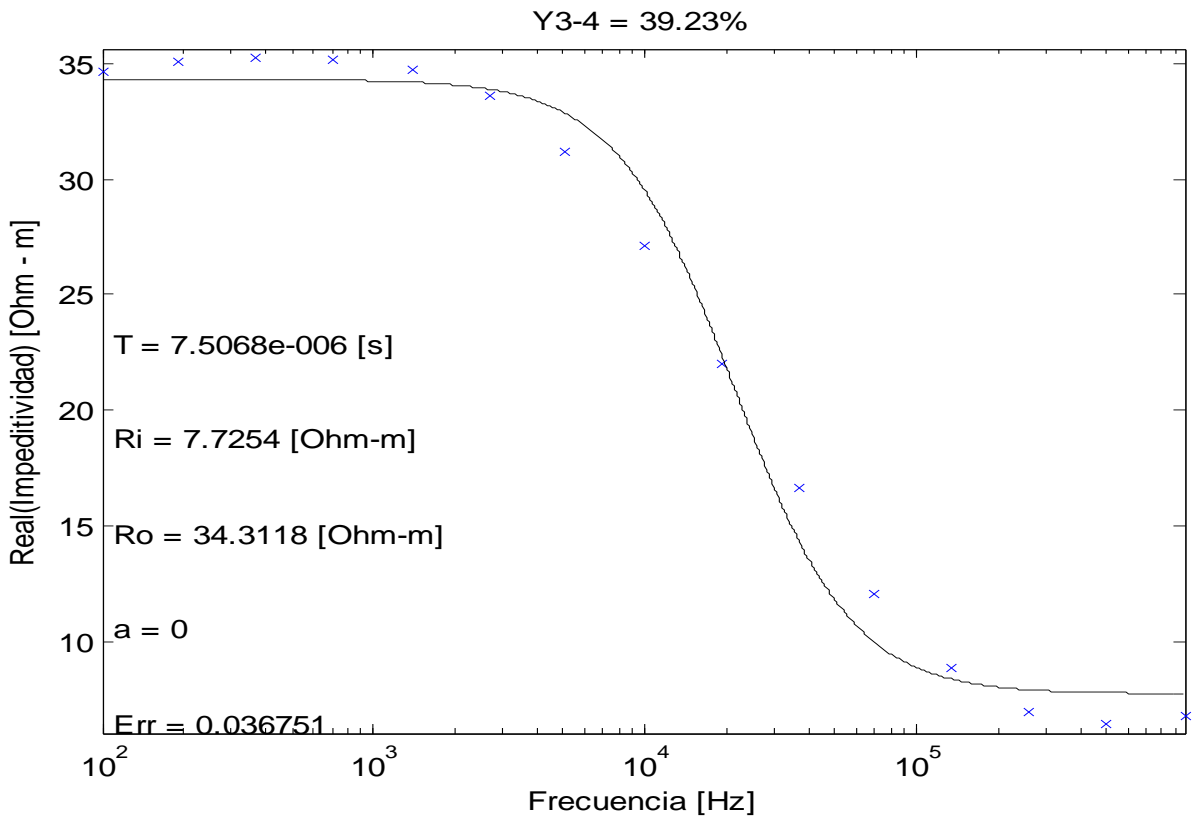
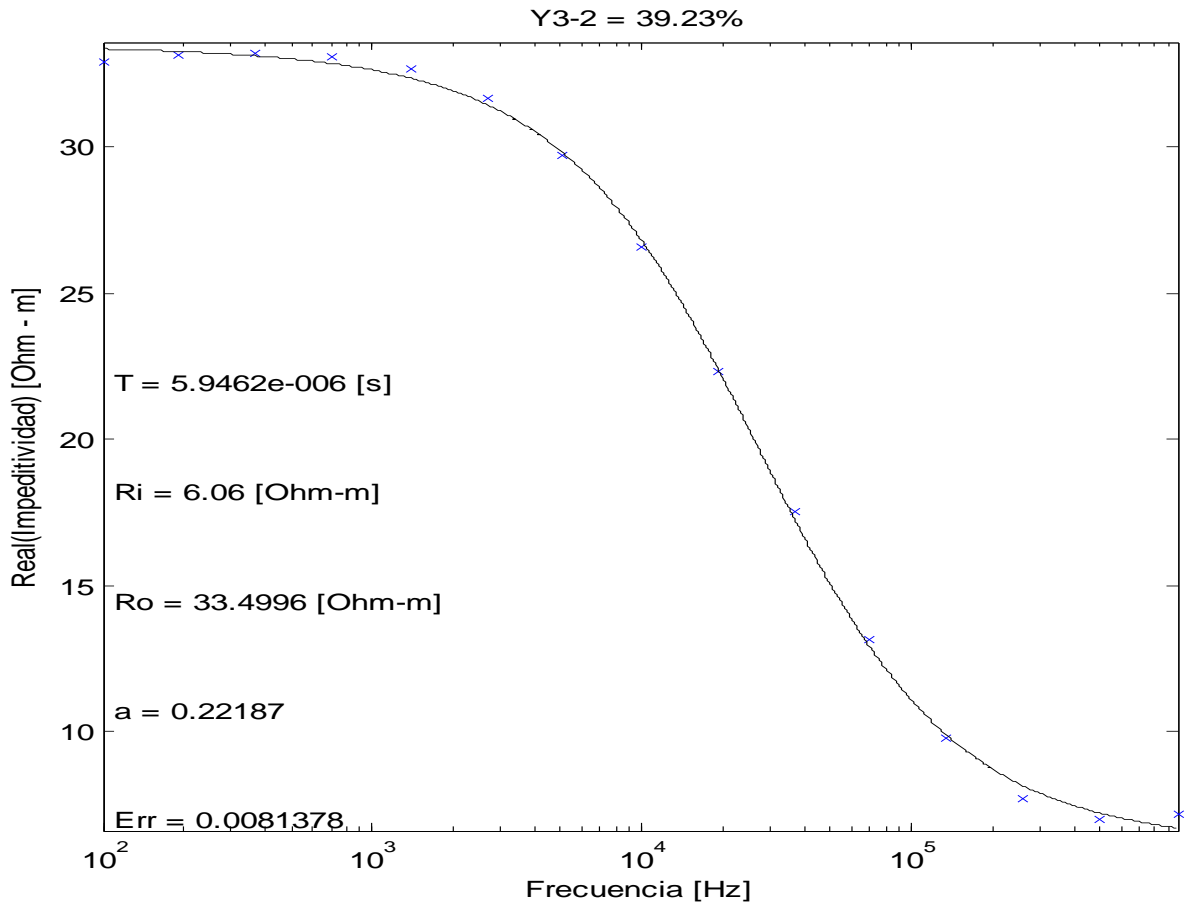


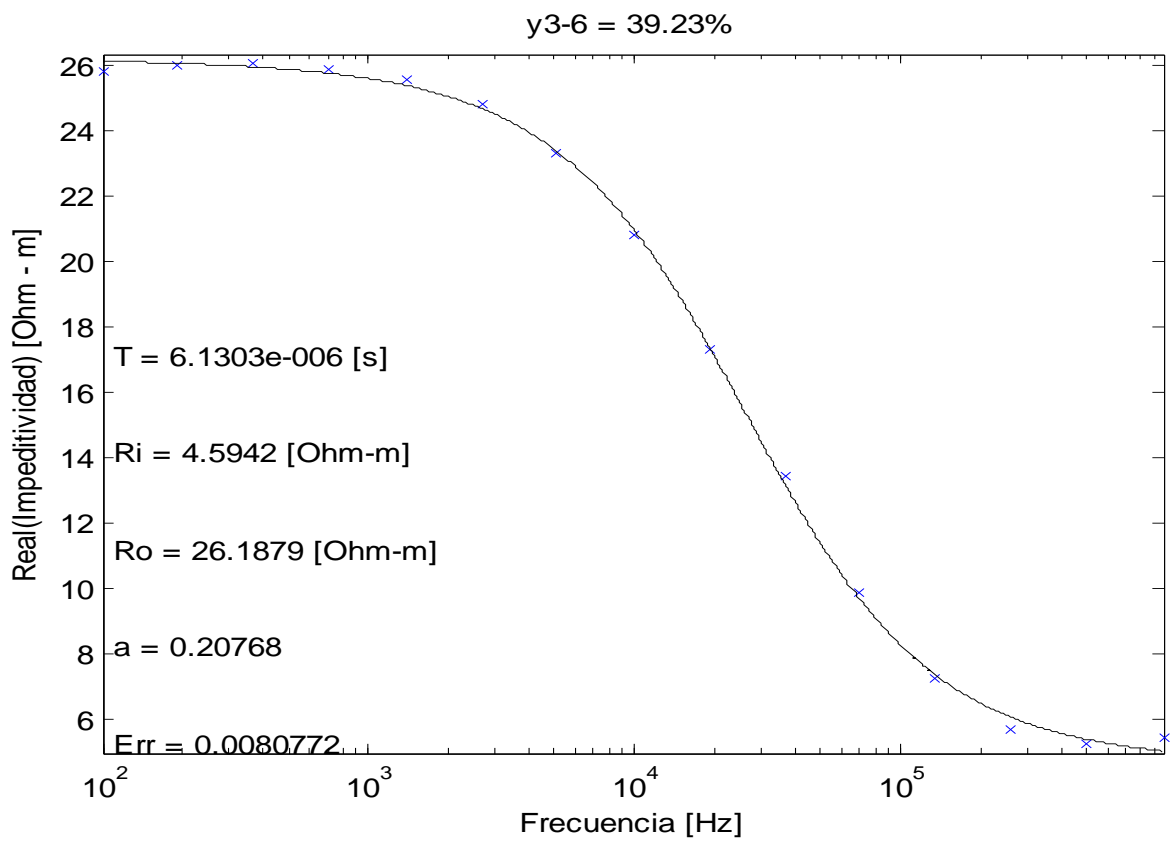
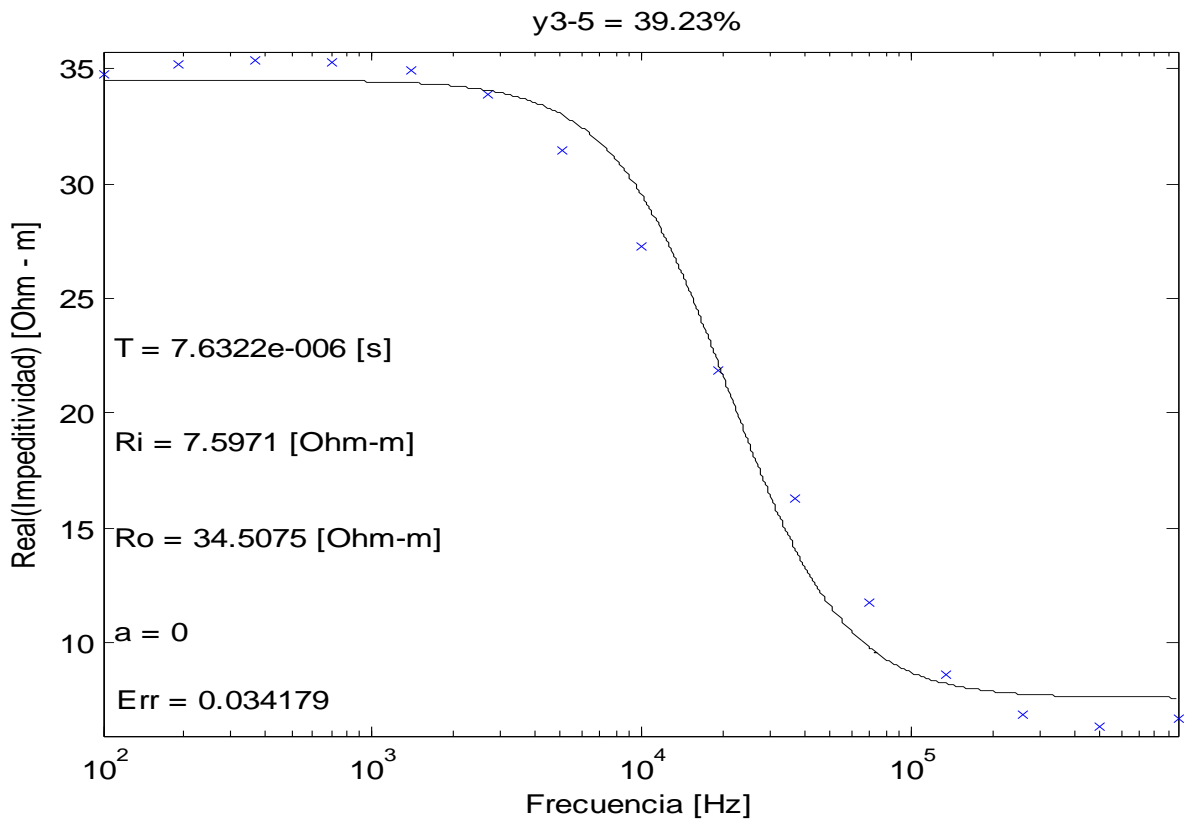


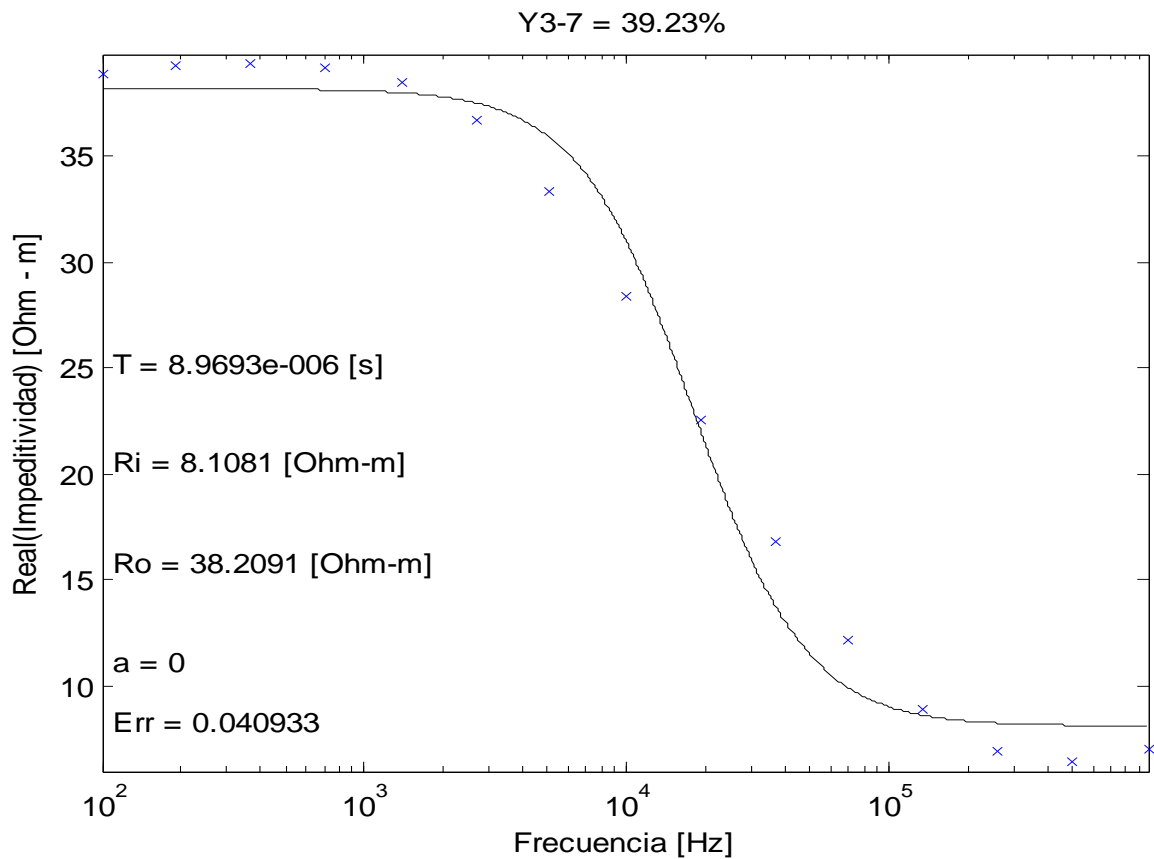


No Muestra (Peso Total de la muestra):	Muestra No 3 (2570 gr)					
GE [%](Para toda la muestra):	39.23%					
ARCHIVO IM6	y5316	y5317	y5318	y5319	y5322	y5324
Ro [Ohms-m]	31.882	33.4996	34.3118	34.51	26.188	38.21
PESO [gr]:	340	330	250	500	610	540
Serie de Identificación	Y3_1	Y3_2	Y3_4	Y3_5	Y3_6	Y3_7
%AL por Espectrofotometría					40.97%	

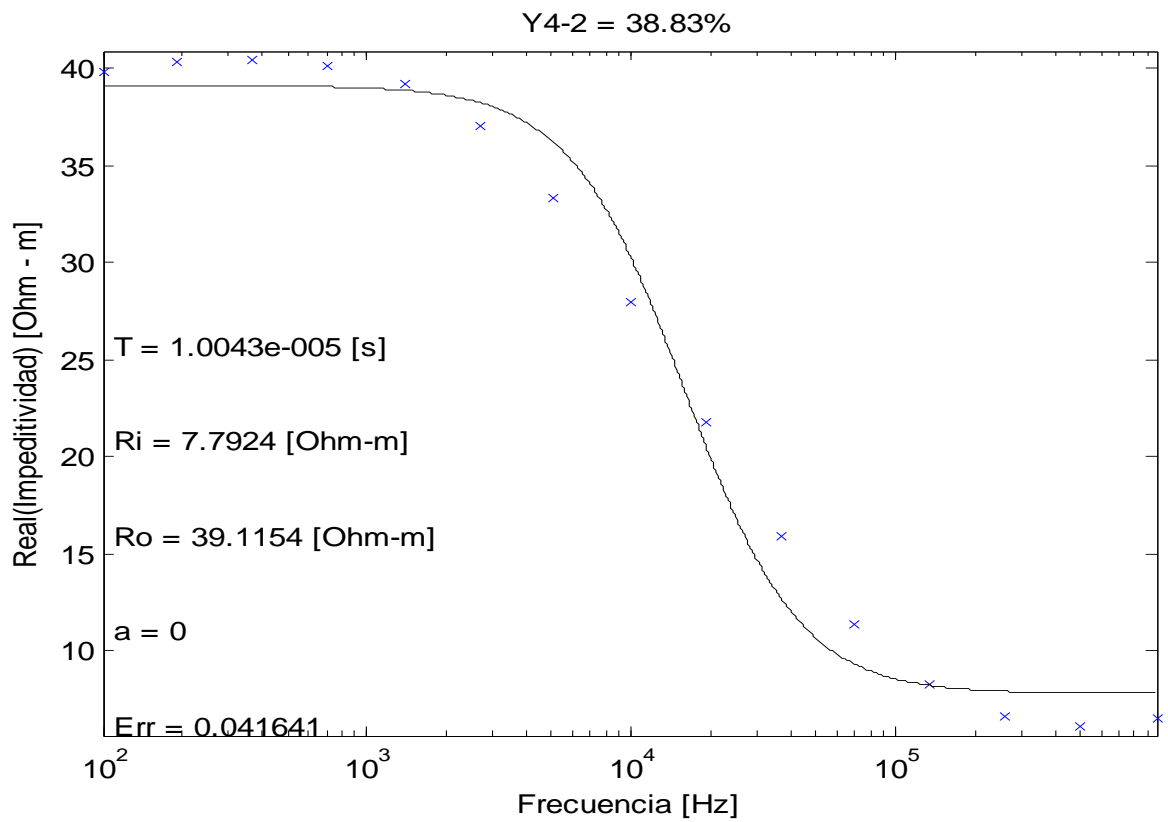
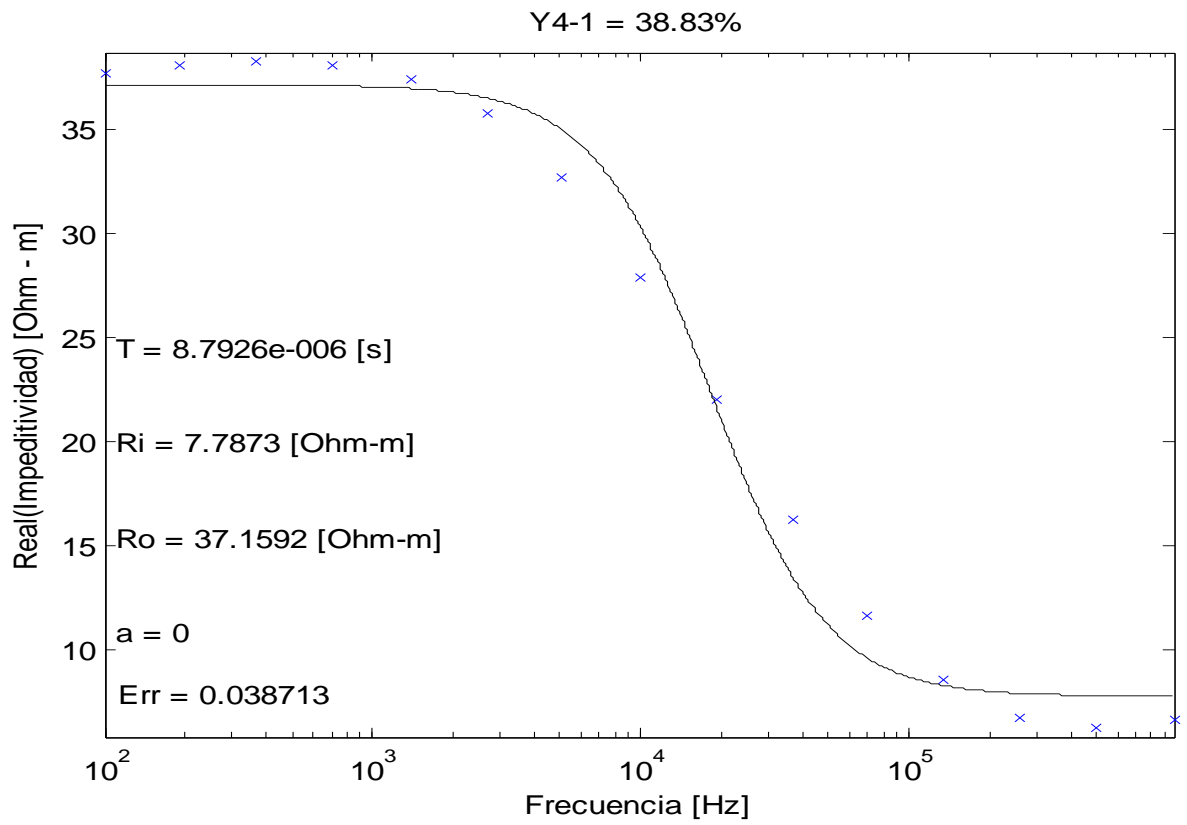


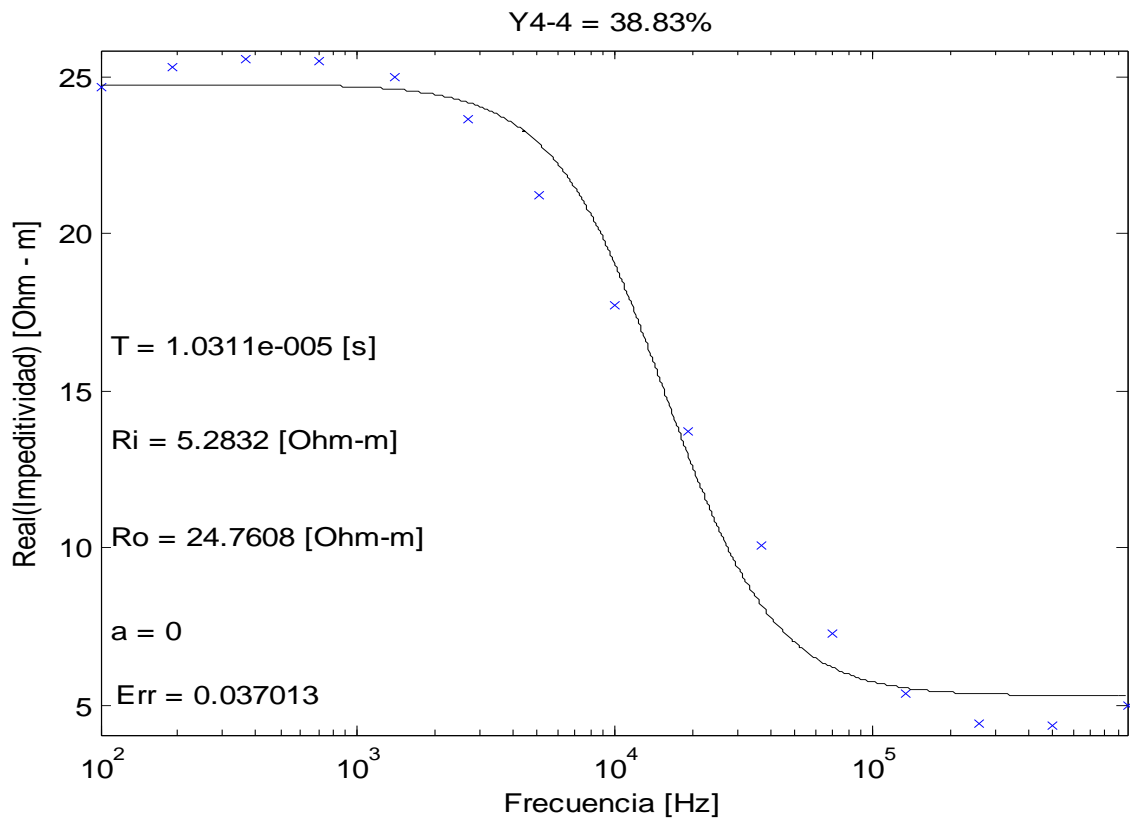
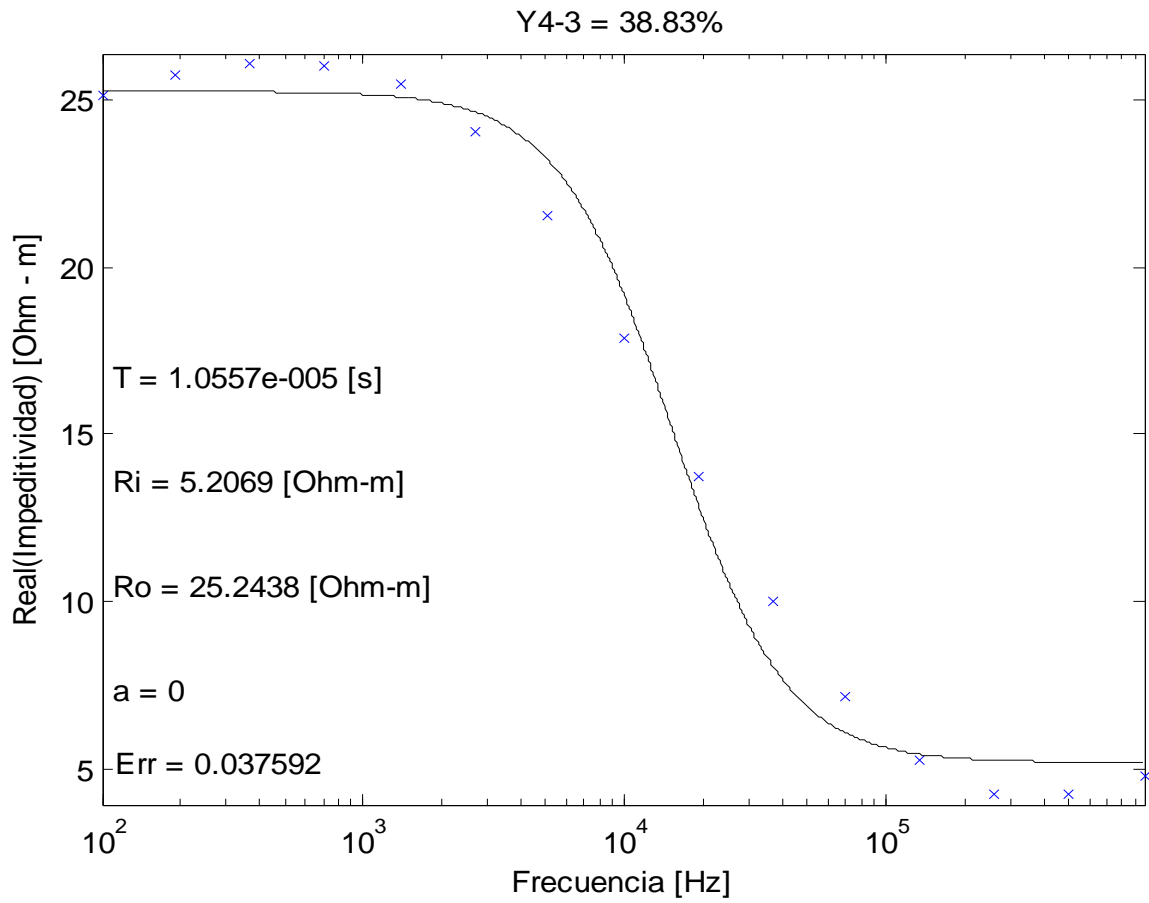


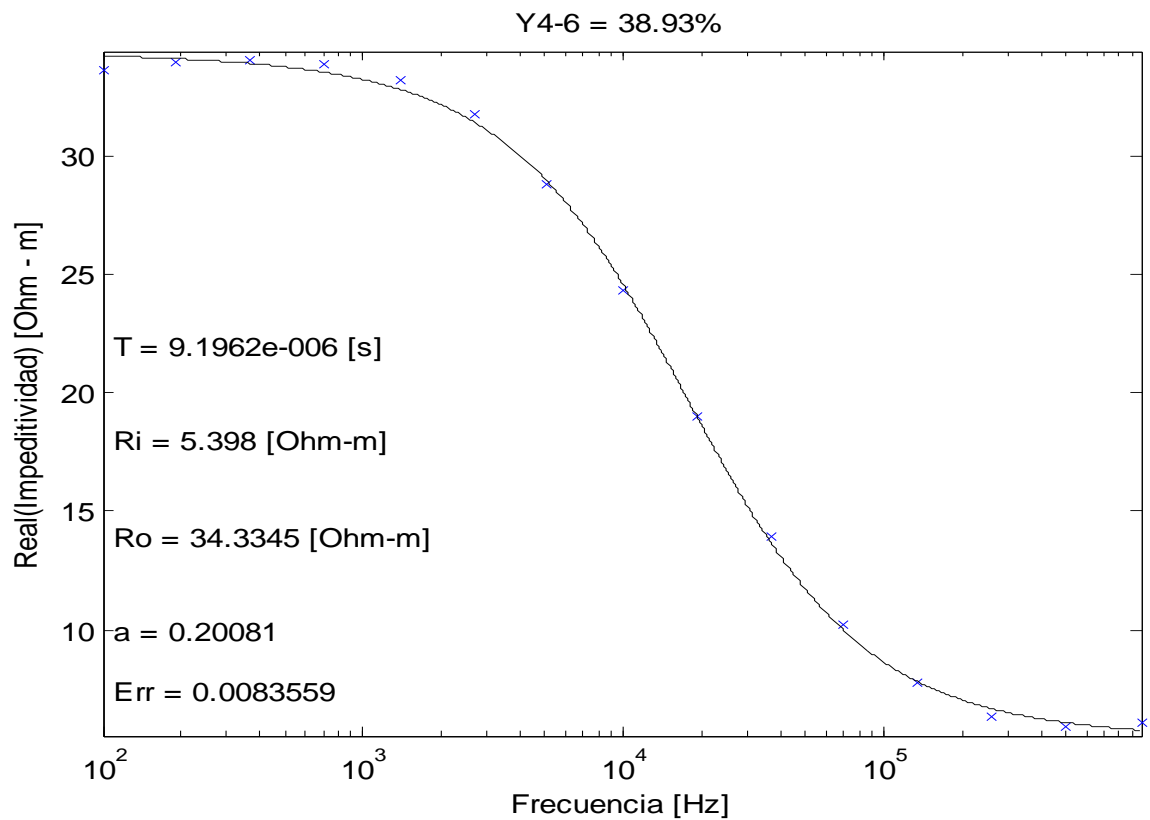
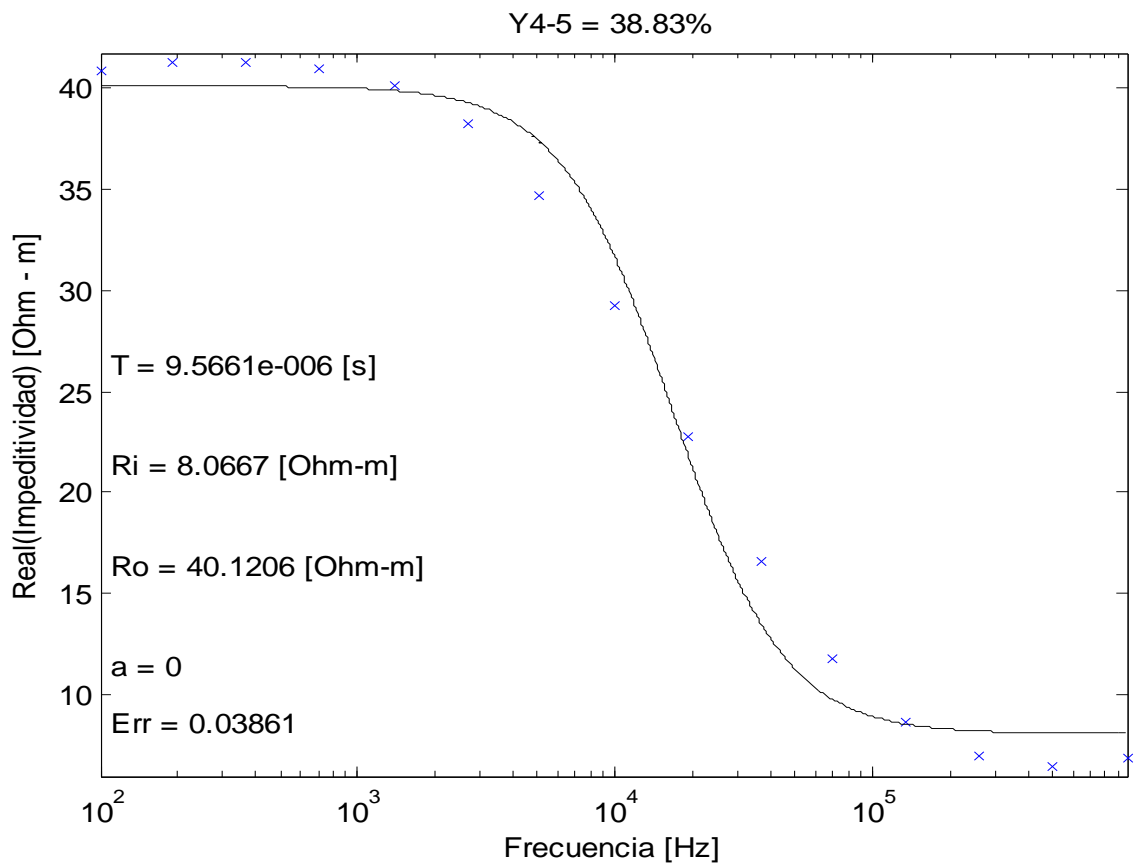


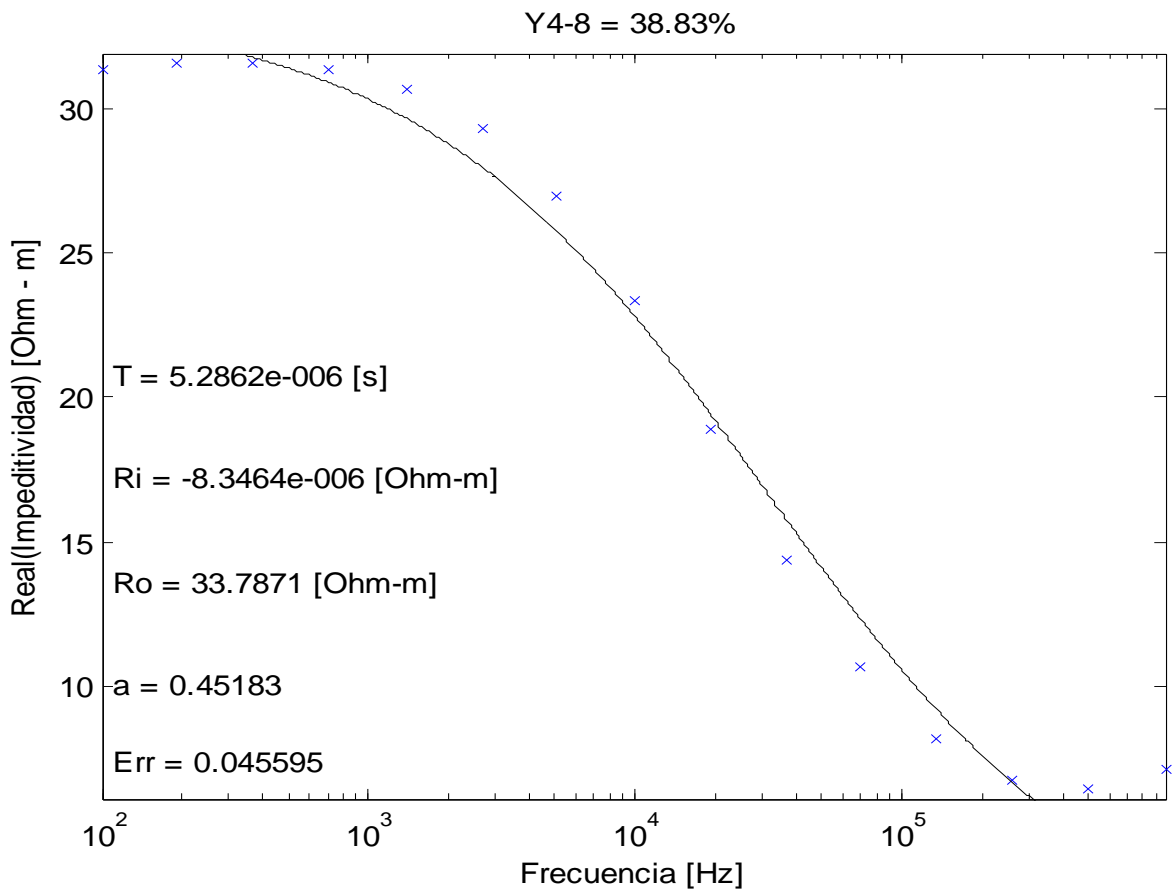
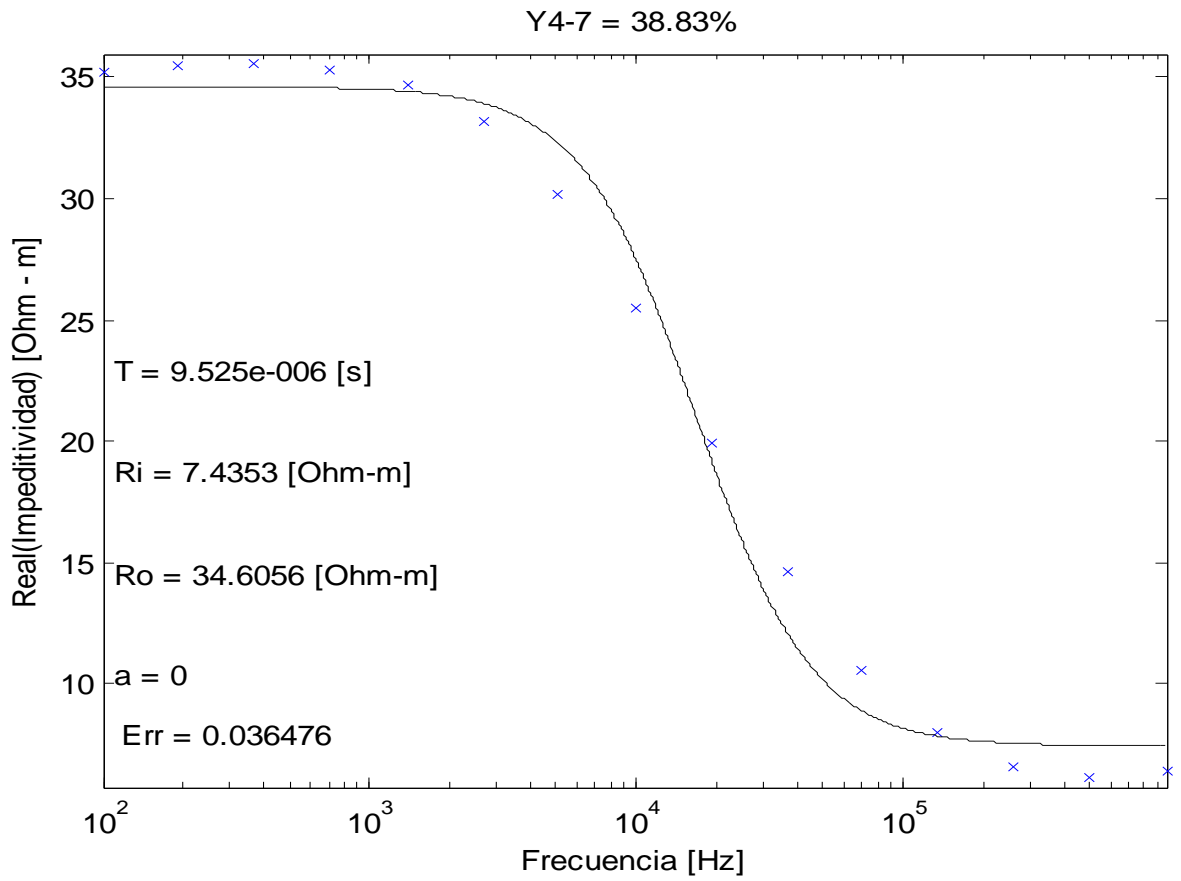


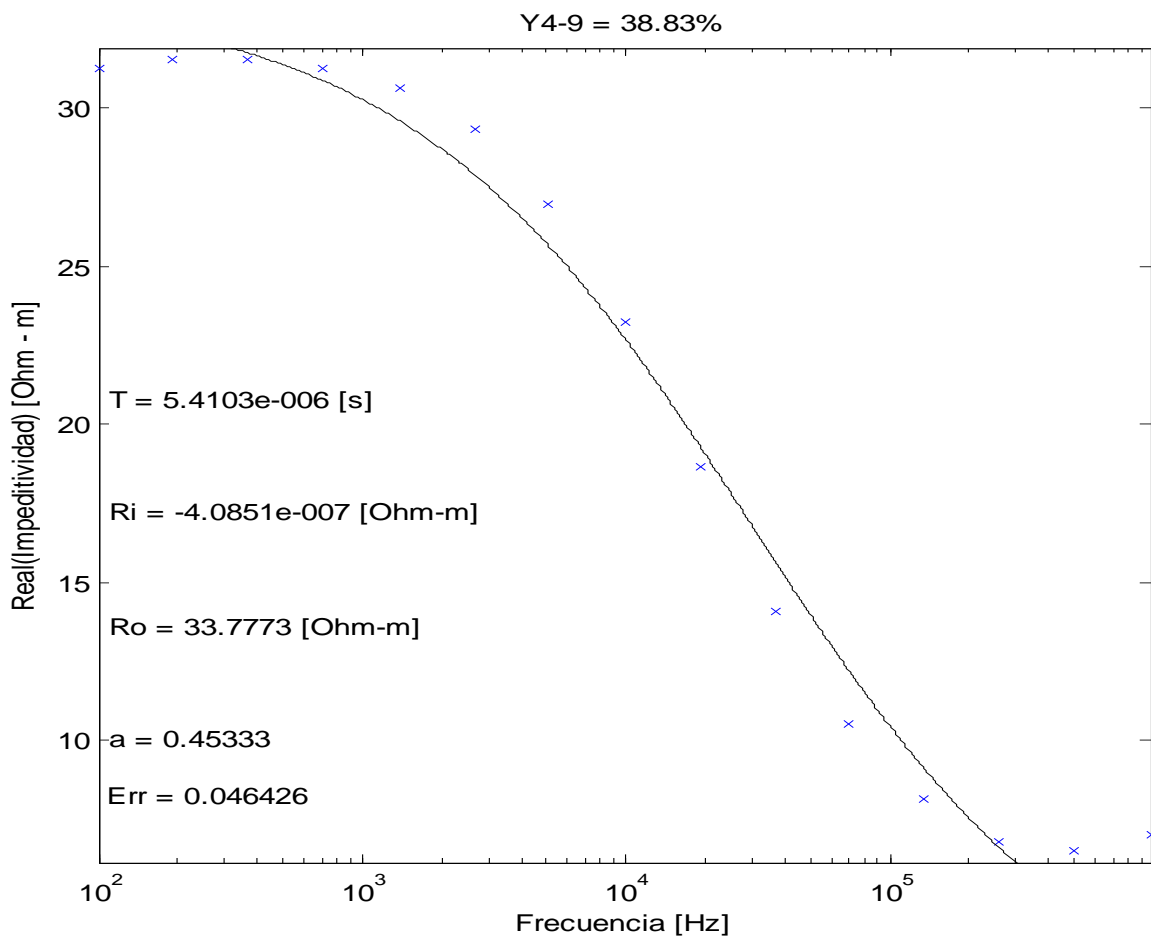
No Muestra (Peso Total de la muestra):	Muestra No 4 (3400 gr)								
GE [%](Para toda la muestra):	38.83%								
ARCHIVO IM6	y5325	y5328	y5329	y5327r	y5329r	y5302e2r	y5302eer	y5330	y5331
Ro [Ohms-m]	37.16	39.12	25.24	24.76	40.121	34.3345	34.6056	33.78	33.78
PESO [gr]:	260	310	350	420	500	410	370	530	240
Serie de Identificación	Y4_1	Y4_2	Y4_3	Y4_4	Y4_5	Y4_6	Y4_7	Y4_8	Y4_9
%AL por Espectrofotometría									



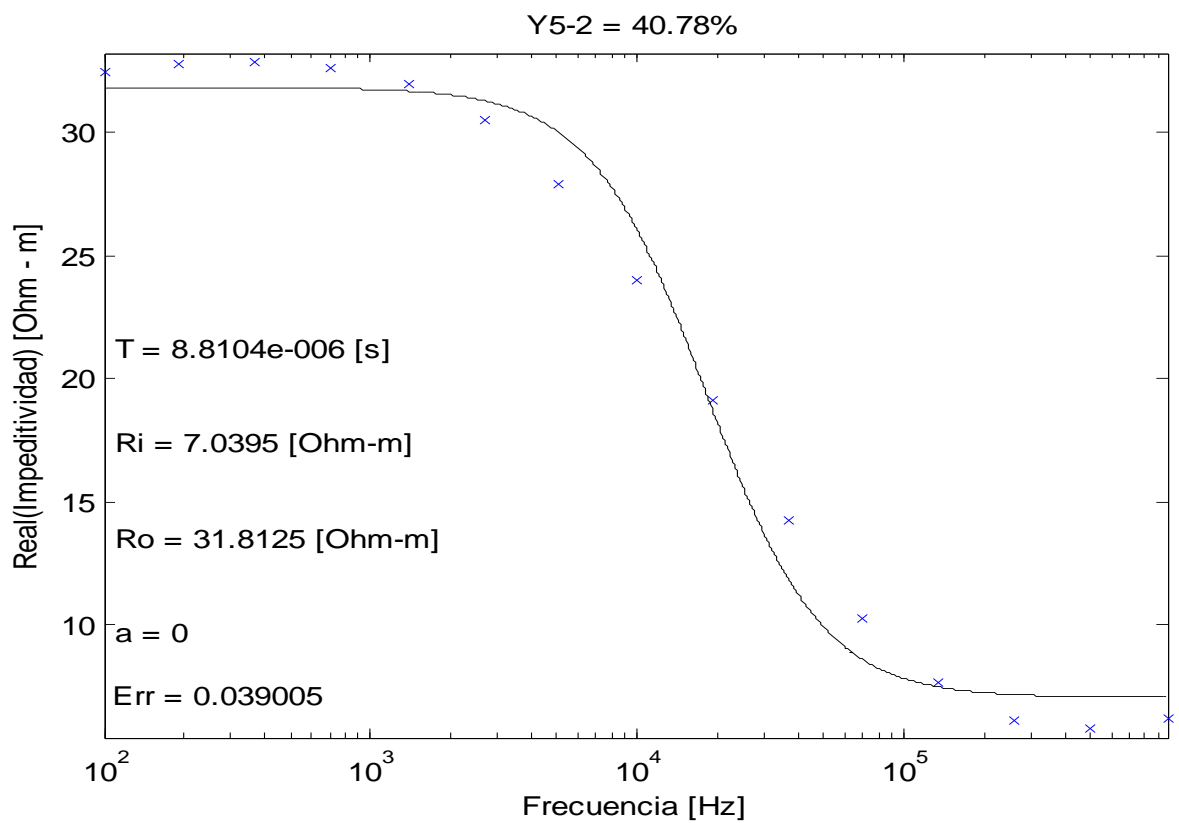
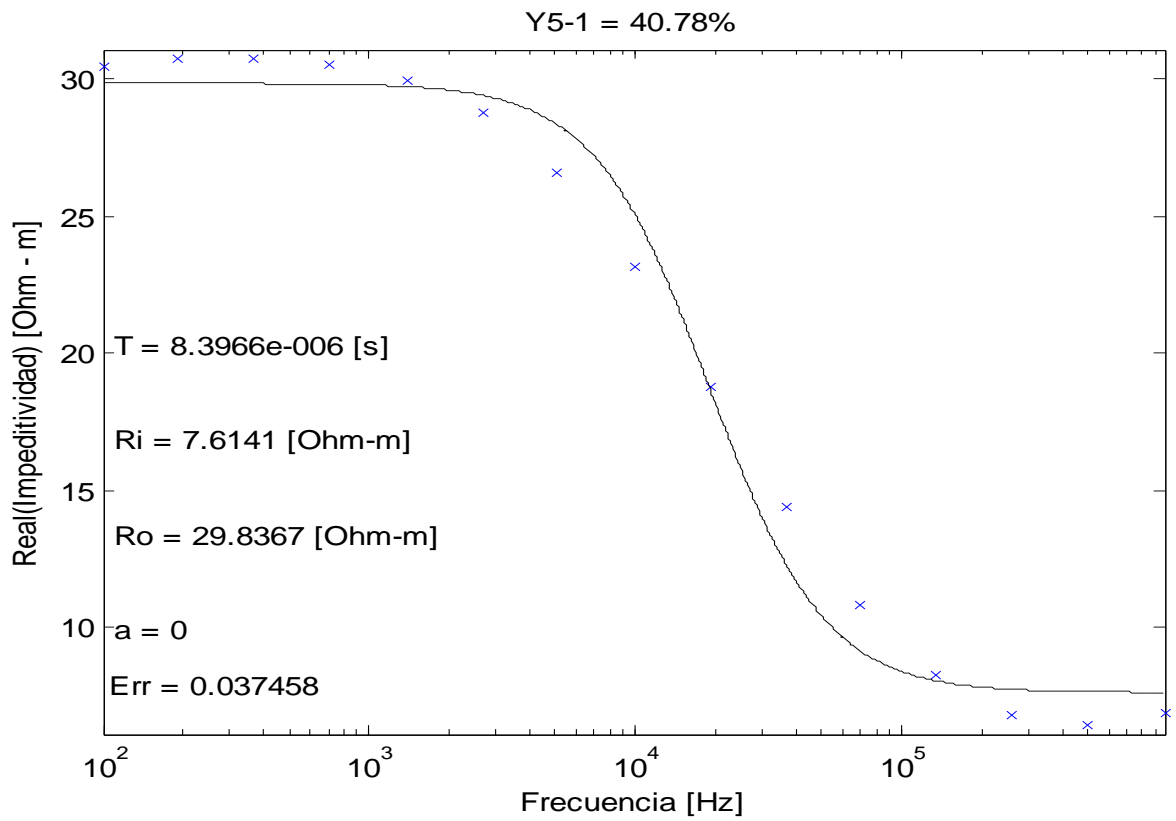


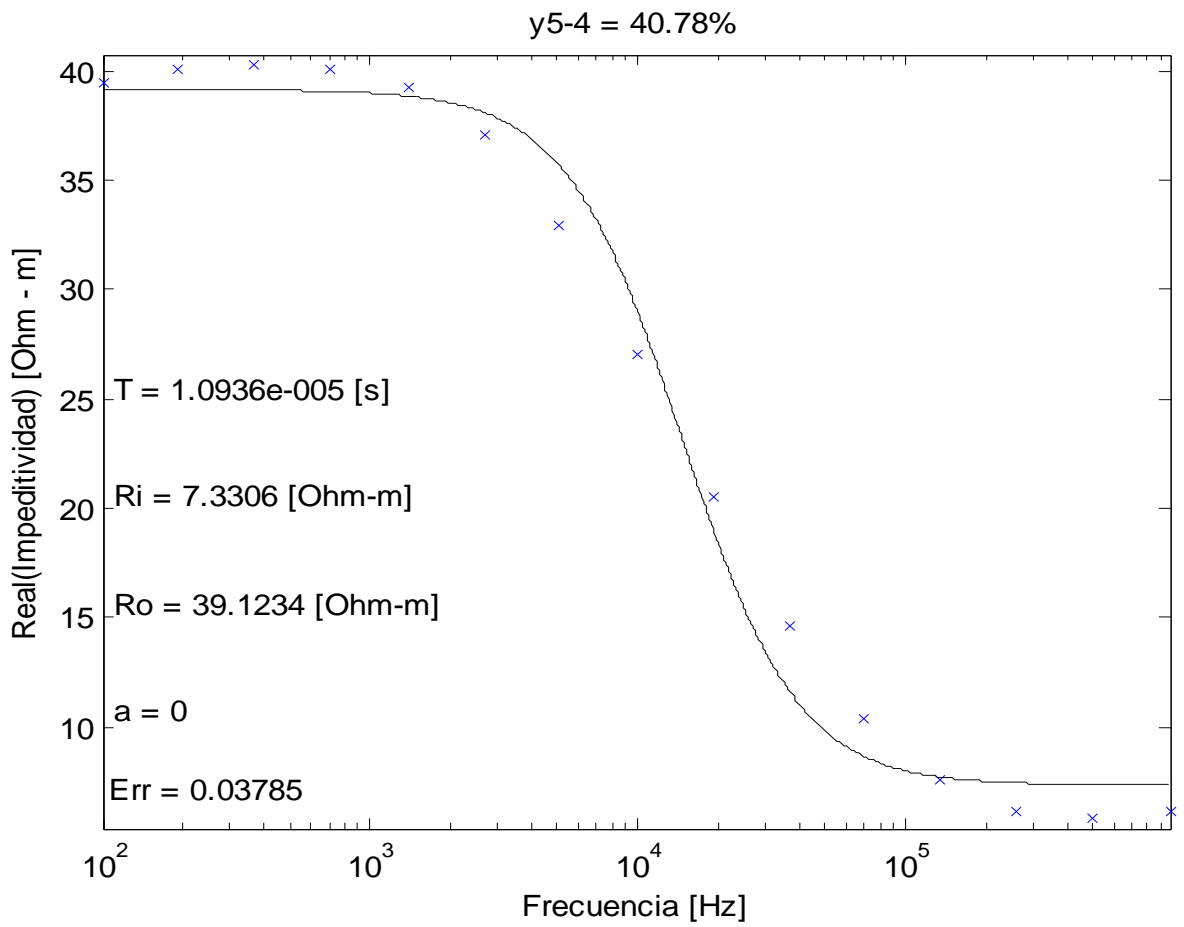
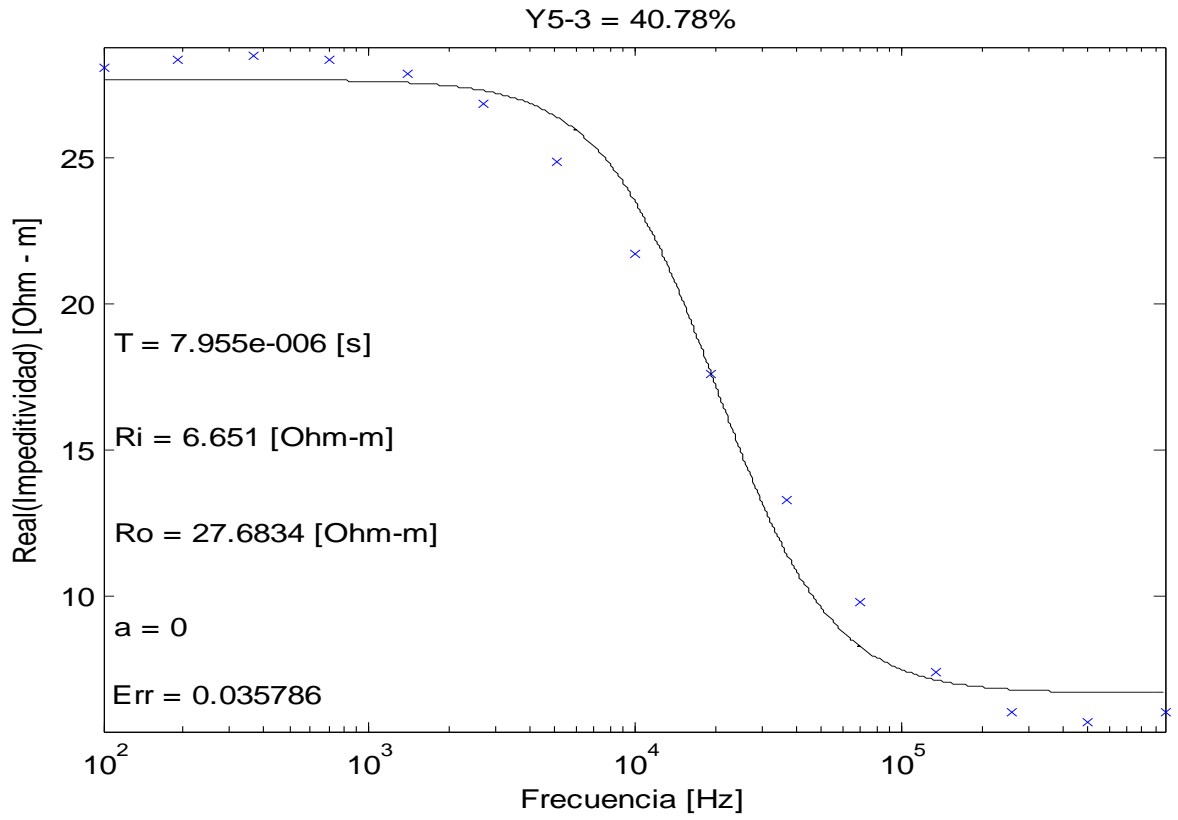


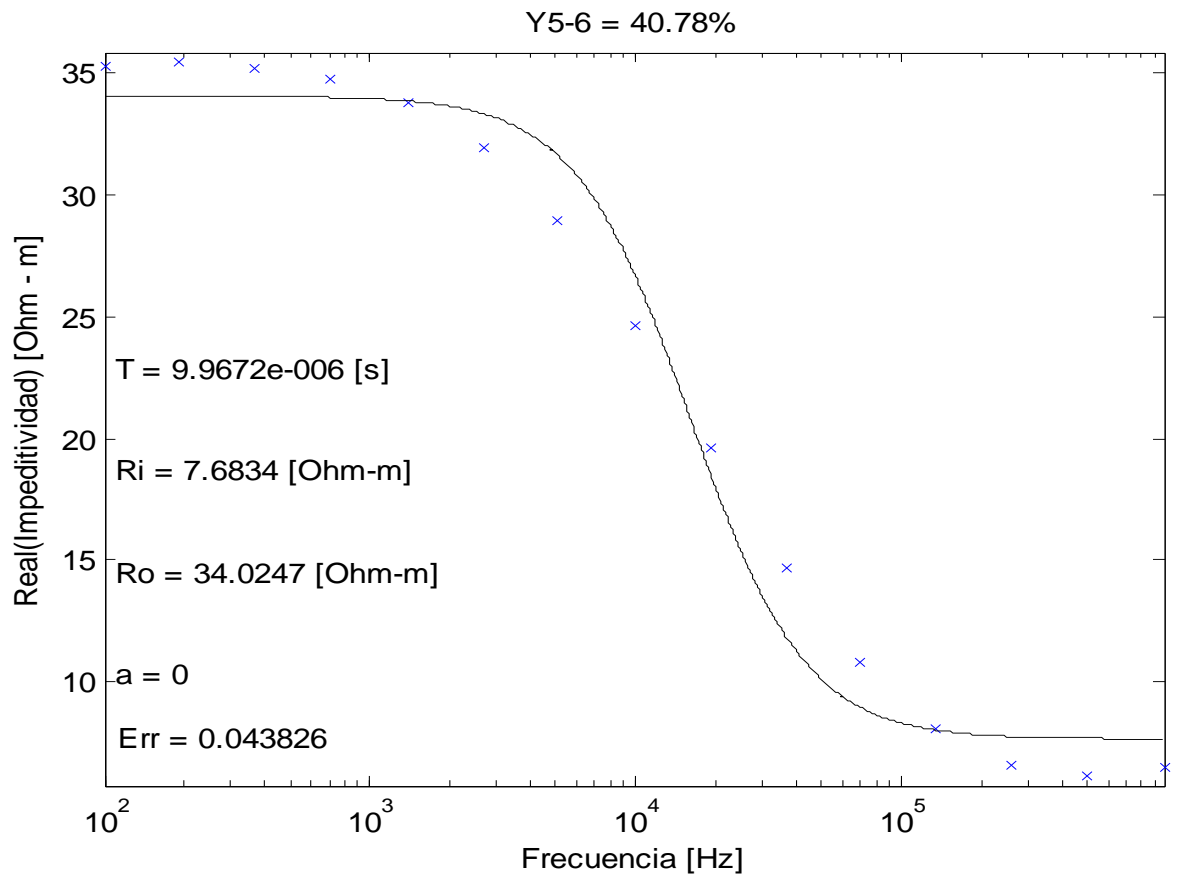
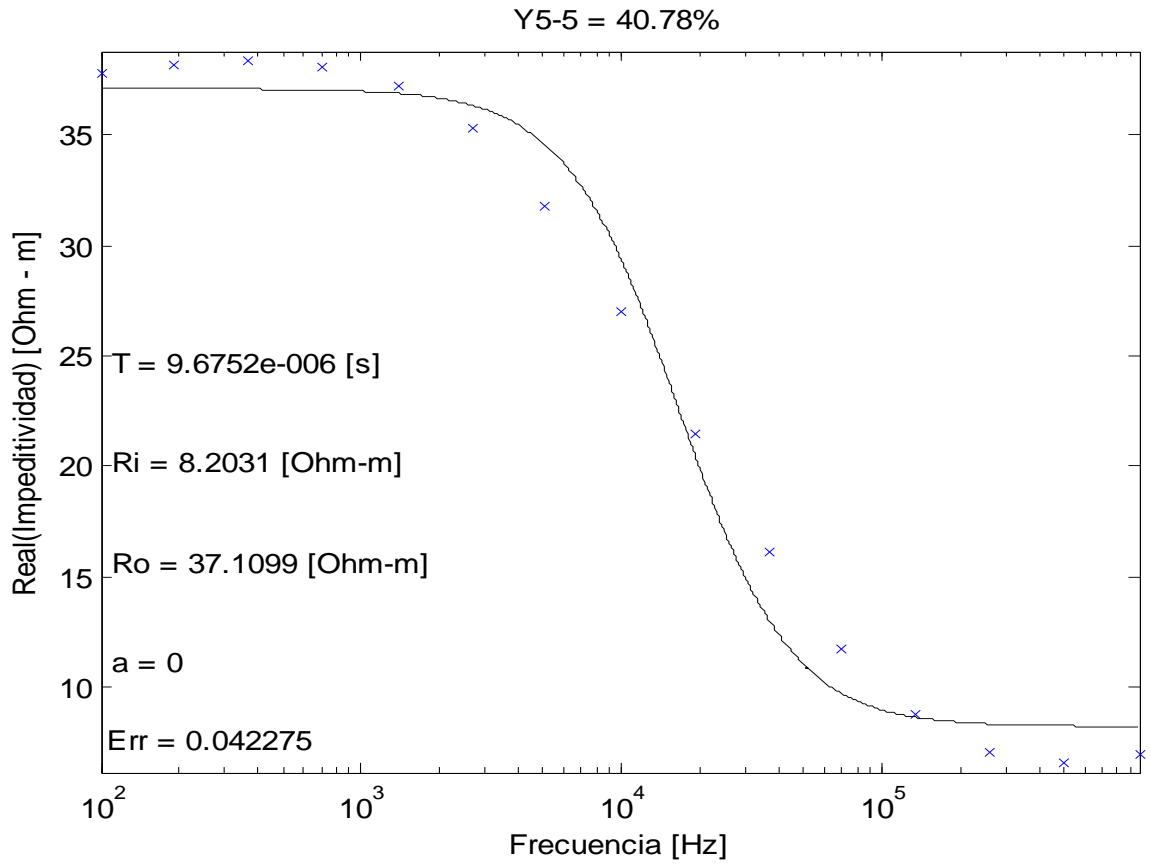




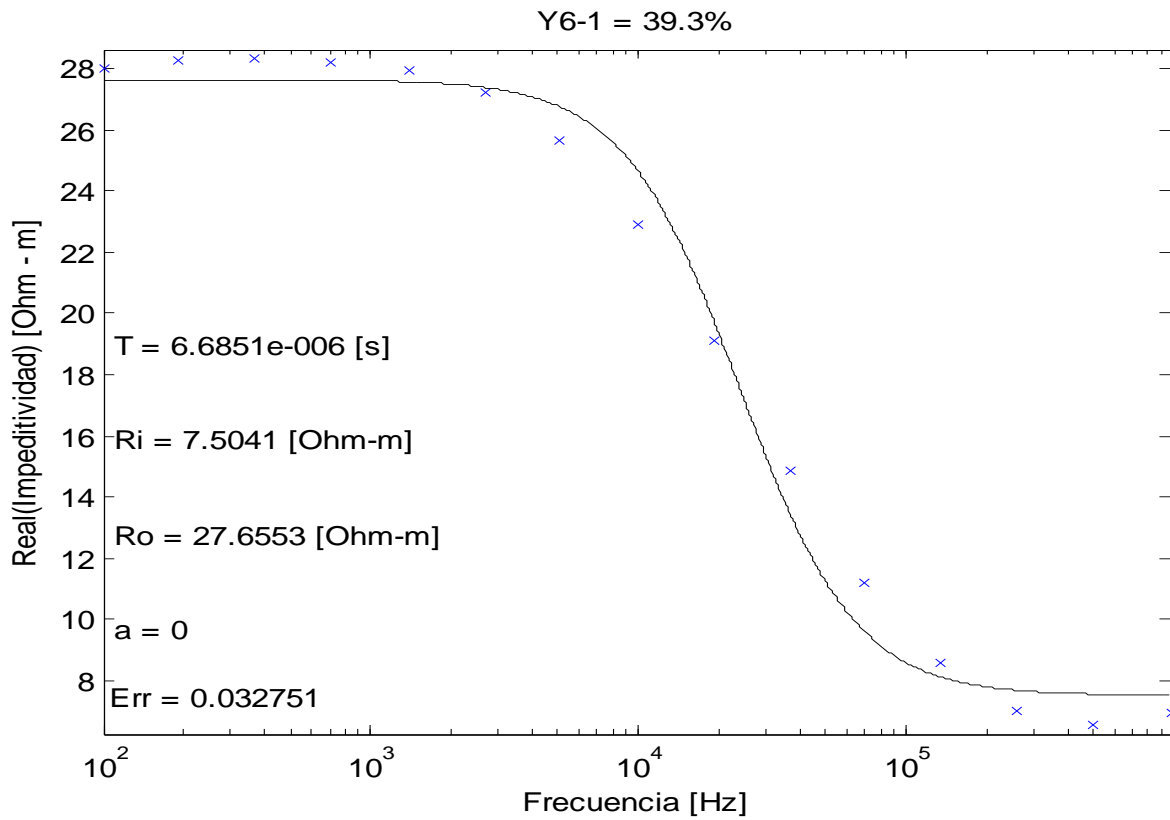
No Muestra (Peso Total de la muestra):	Muestra No 5 (2450 gr)					
GE [%](Para toda la muestra):	40.78%					
ARCHIVO IM6	y5334	y5336	y5337	y5338	y5342	y5343
Ro [Ohms-m]	29.837	31.81	27.68	39.123	37.11	34.03
PESO [gr]:	430	290	380	320	450	570
Serie de Identificación	Y5_1	Y5_2	Y5_3	Y5_4	Y5_5	Y5_6
%AL por Espectrofotometría						



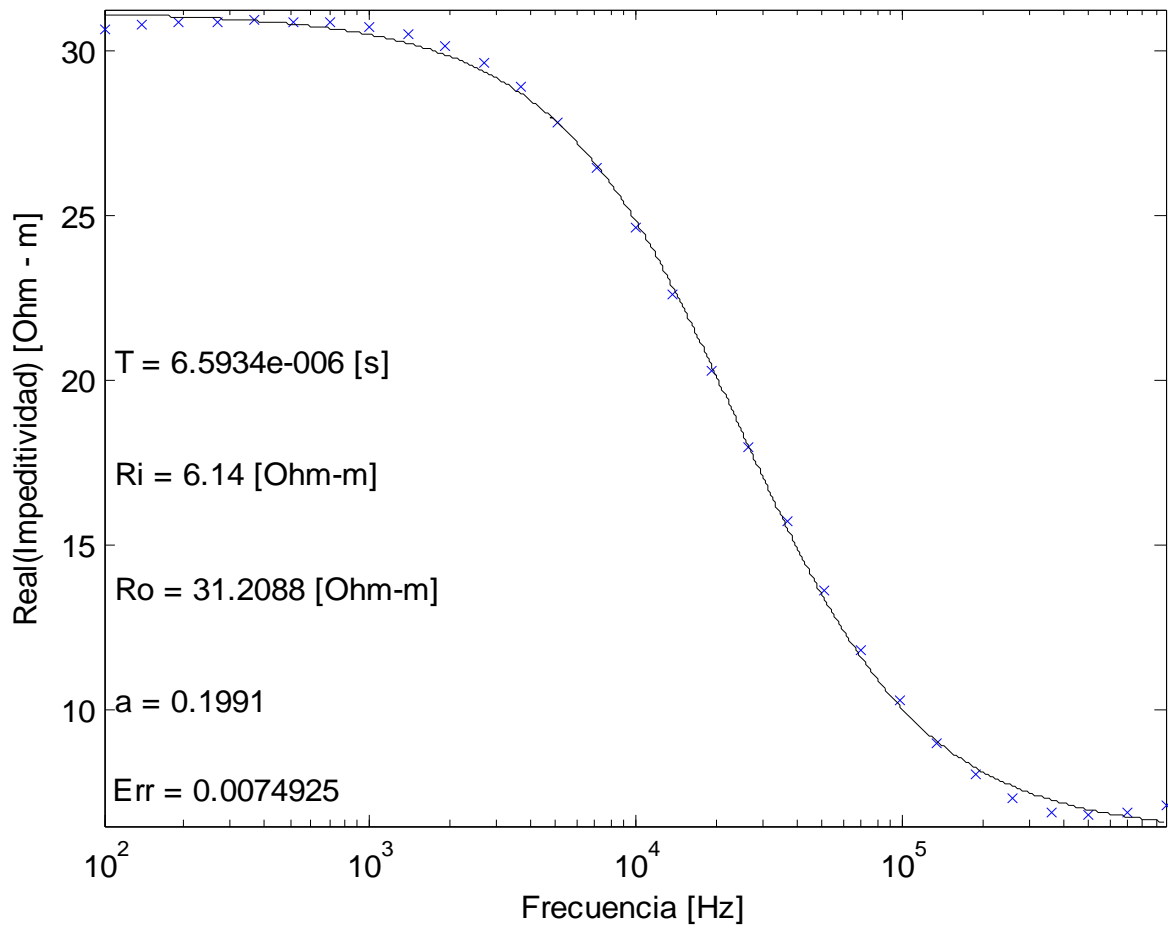




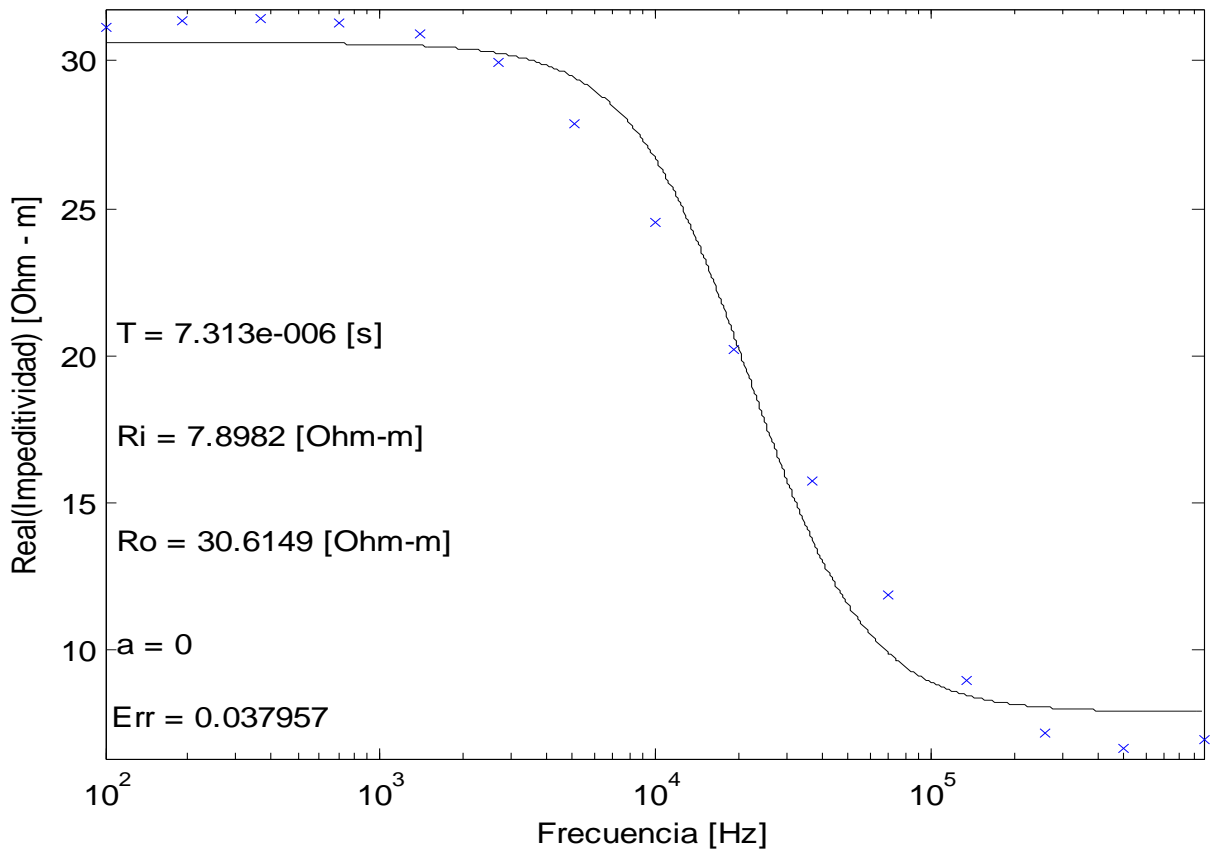
No Muestra (Peso Total de la muestra):	Muestra No 6 (3070 gr)							
GE [%](Para toda la muestra):	39.30%							
ARCHIVO IM6	y7302	y7303	y7304	y7308	y7309	y7310r	y7311	y7314
Ro [Ohms-m]	27.655	31.21	30.62	35.23	42.56	41.801	36.844	44.511
PESO [gr]:	270	340	430	290	560	630	230	250
Serie de Identificación	Y6_1	Y6_2	Y6_3	Y6_4	Y6_5	Y6_6	Y6_7	Y6_8
%AL por Espectrofotometría		40.17%						

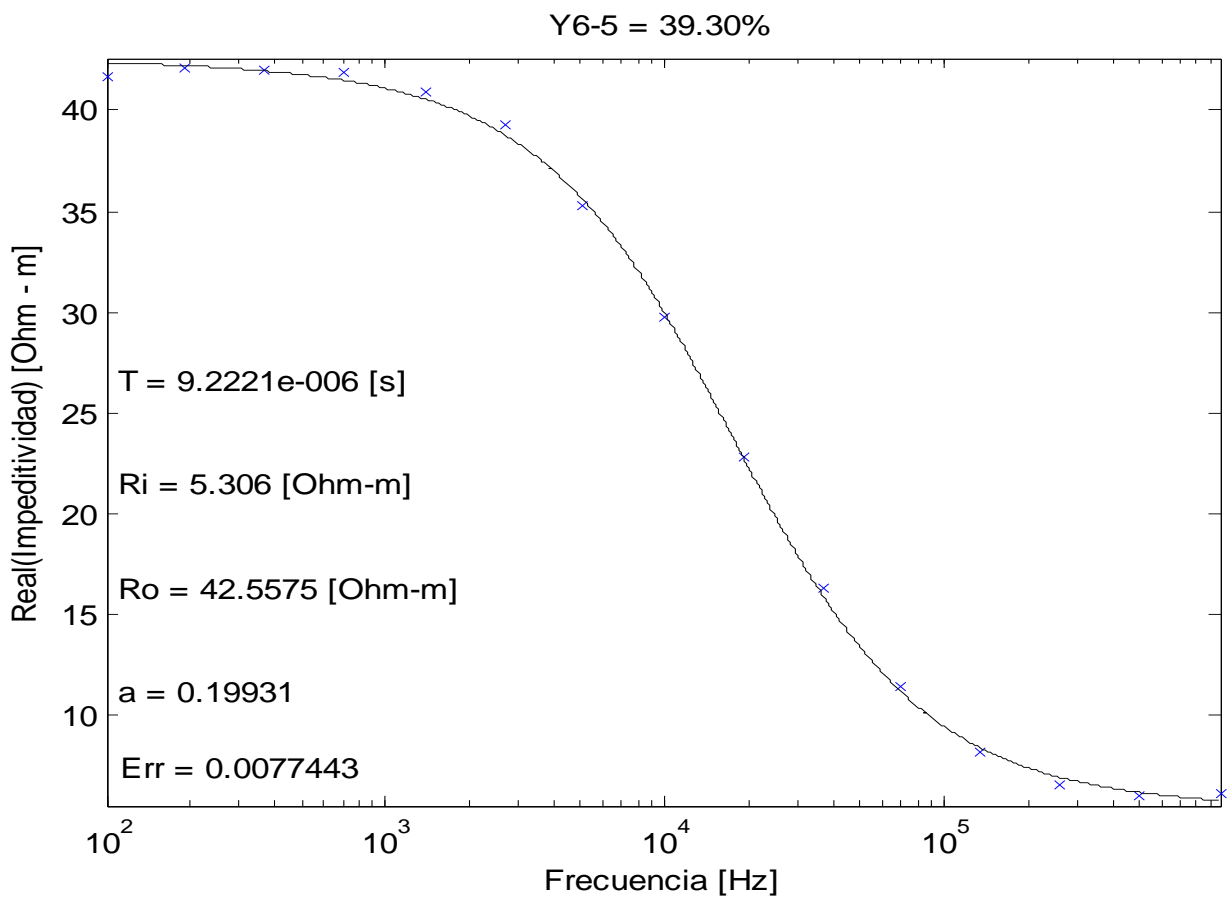
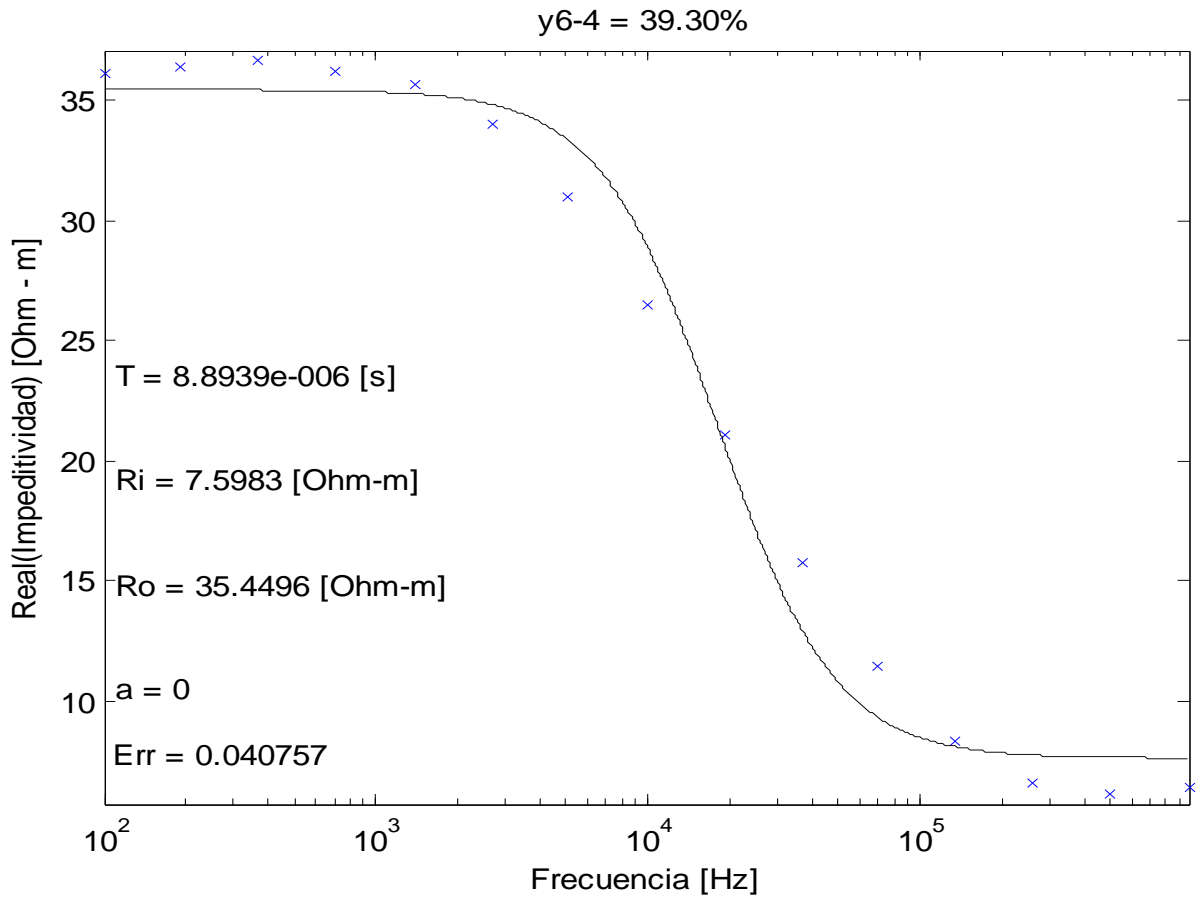


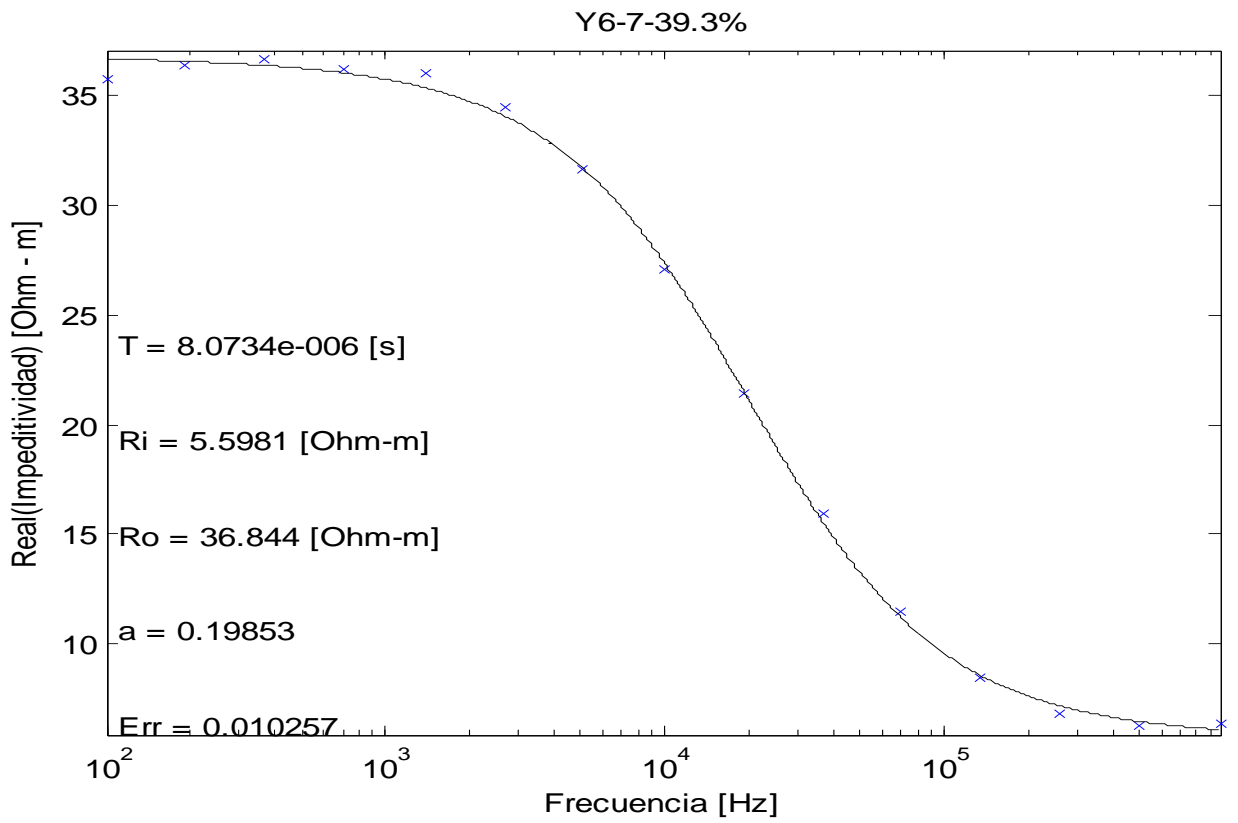
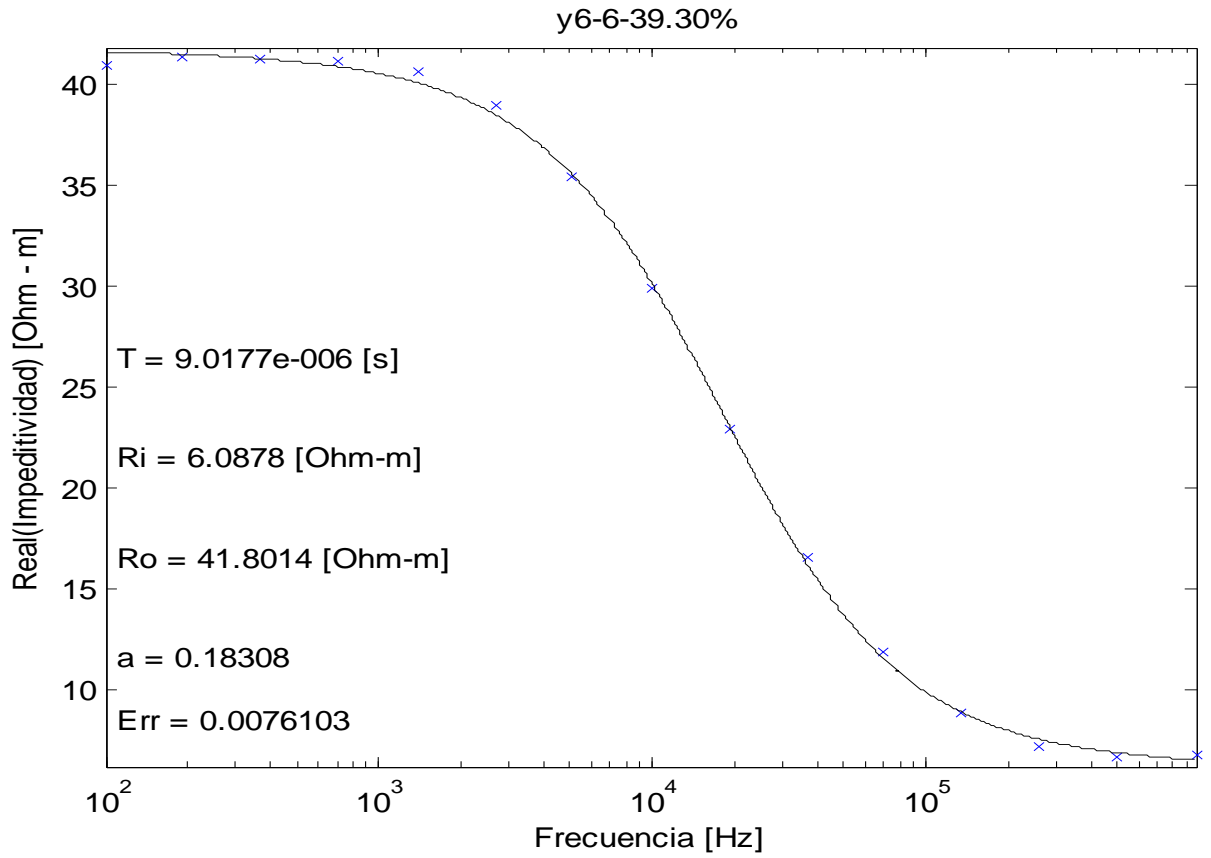
Y 6-2 = 39.3%

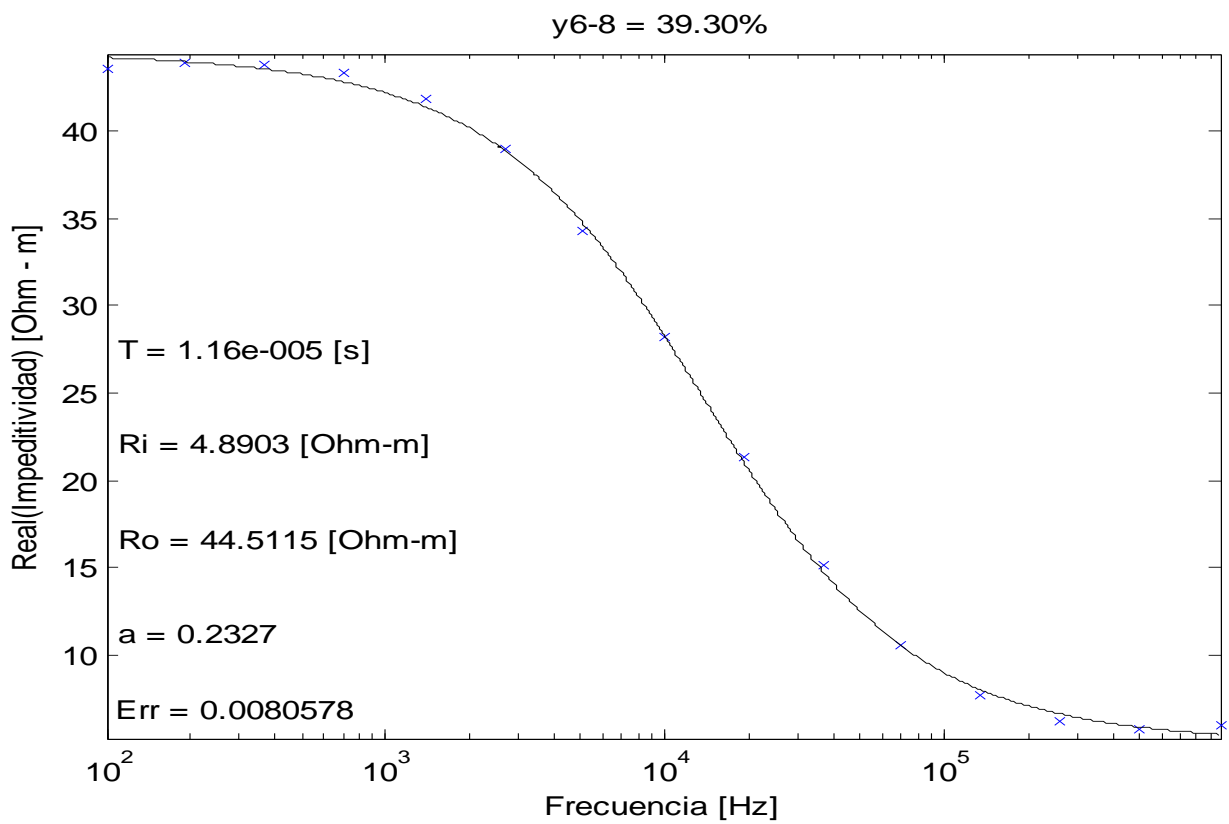
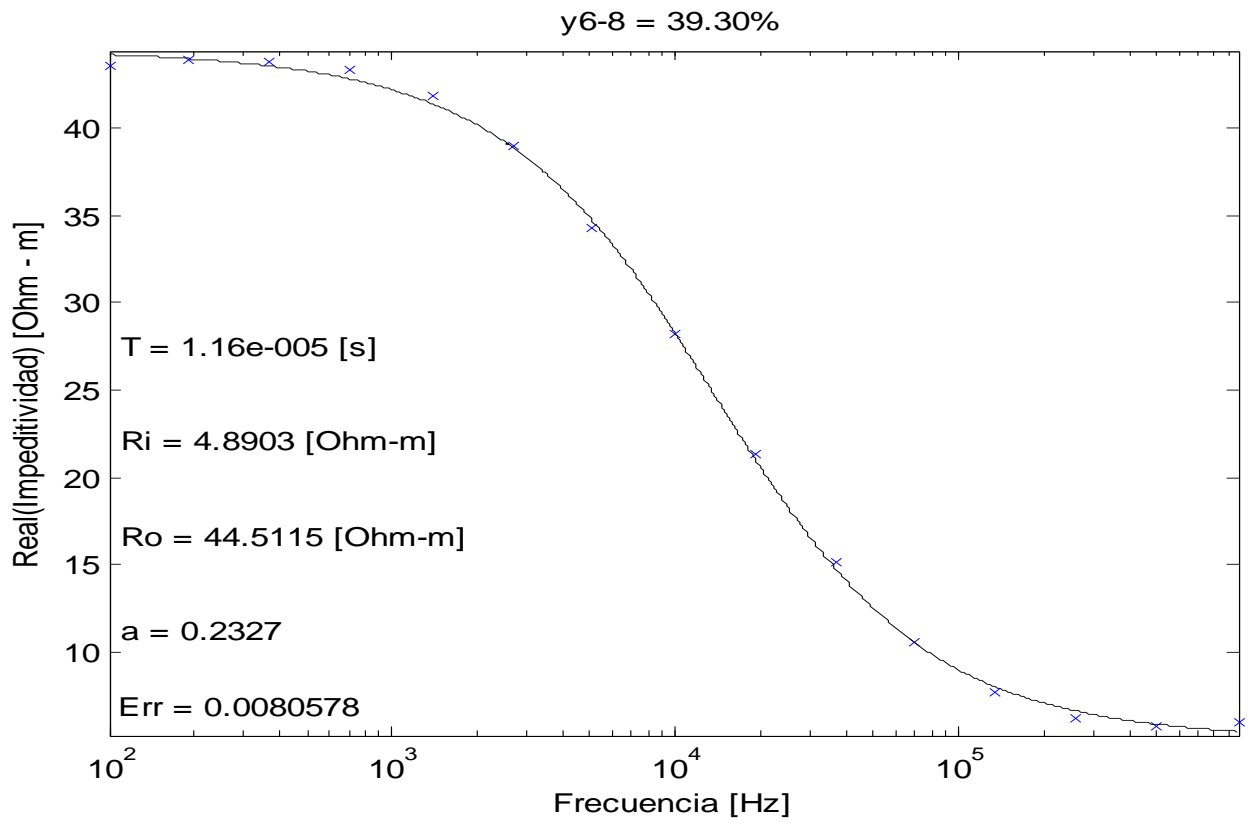


Y6-3 = 39.30%

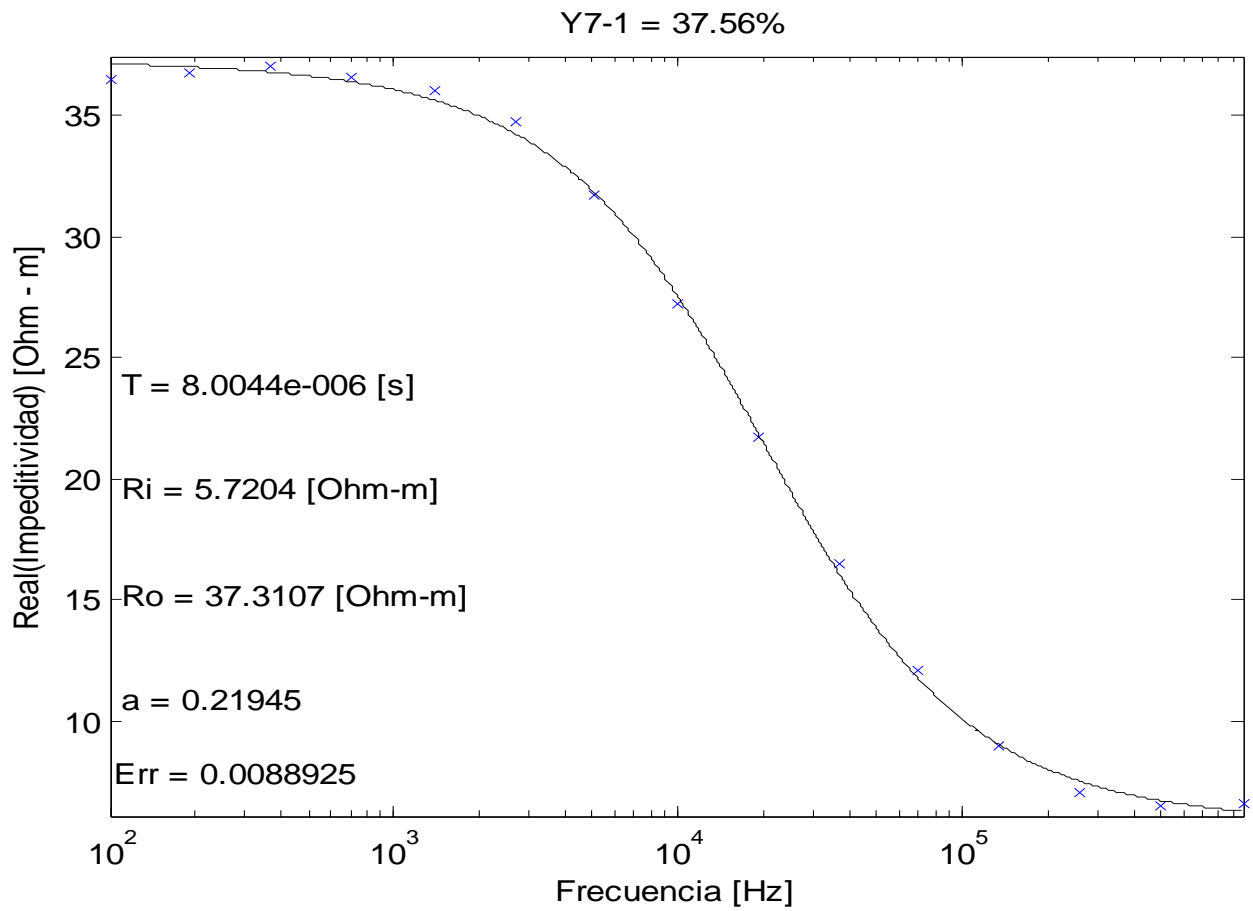




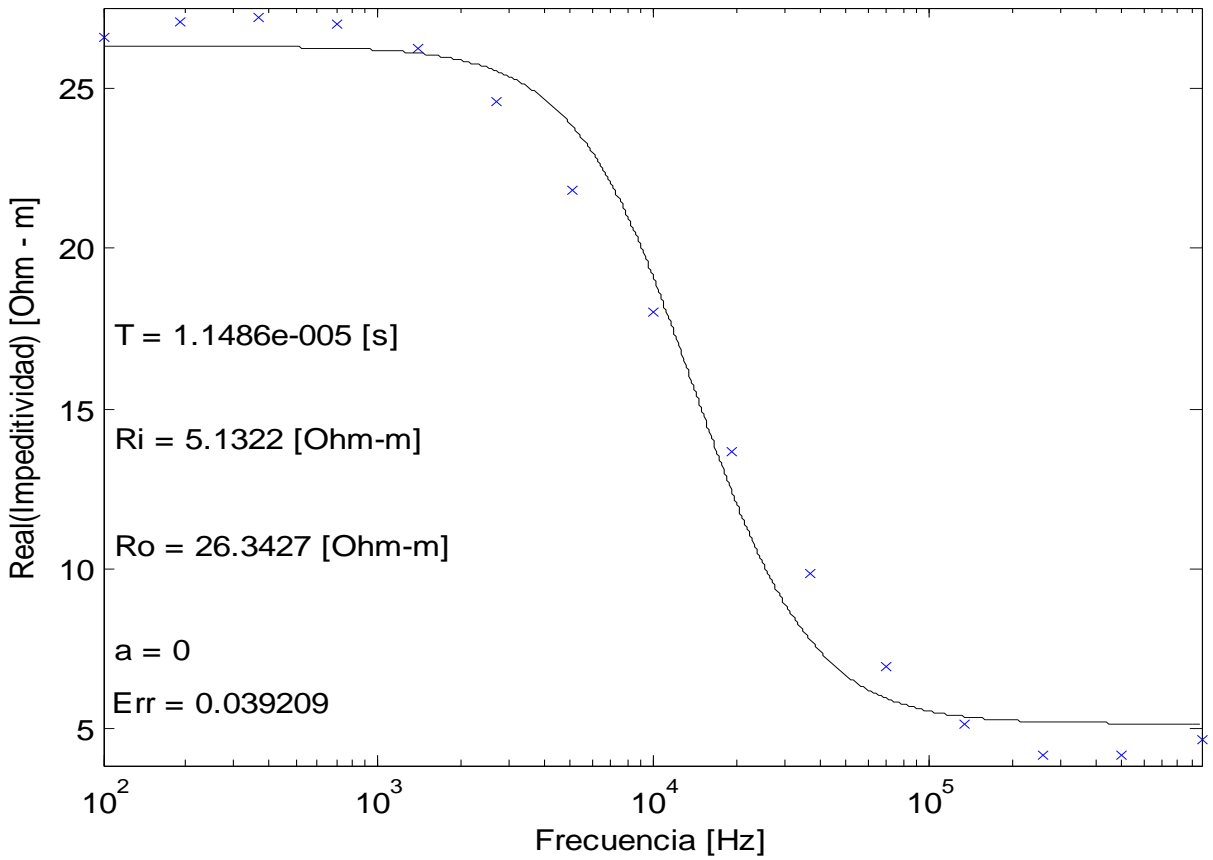
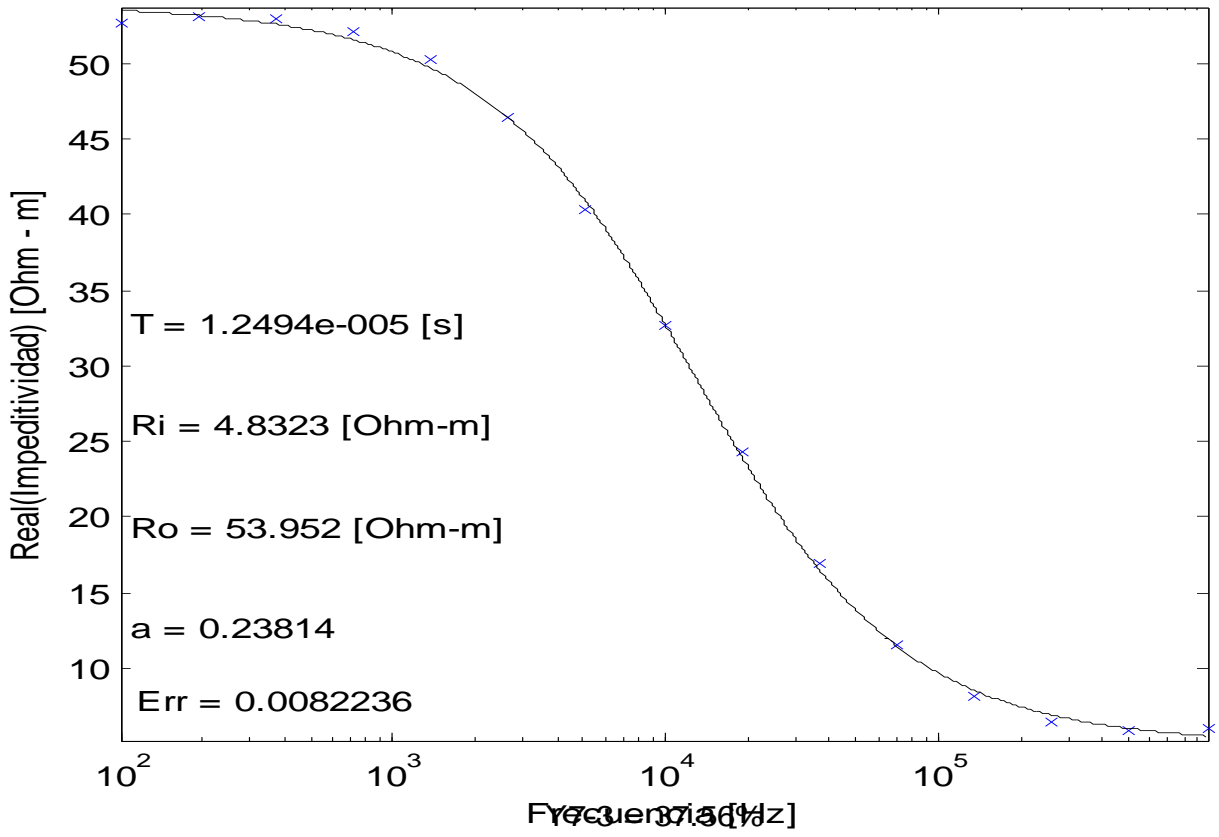


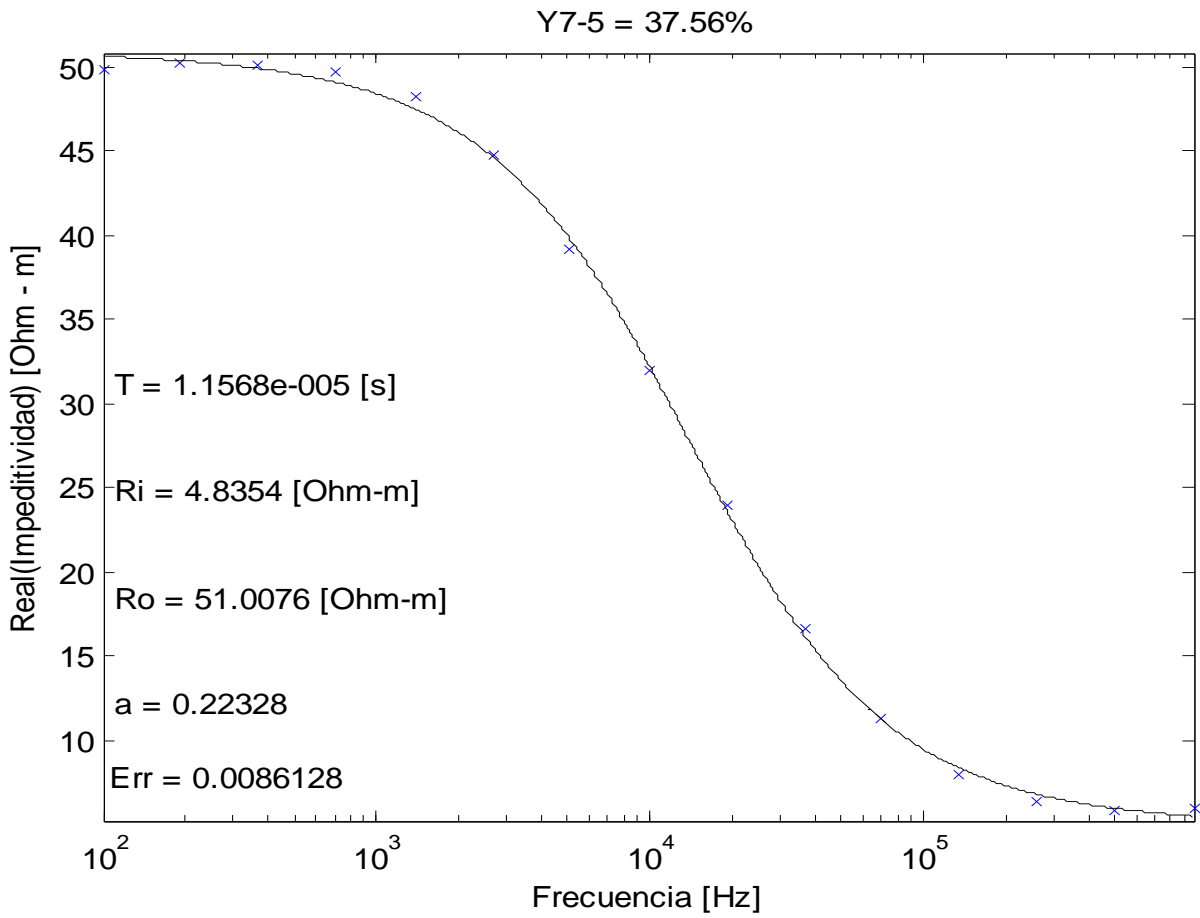
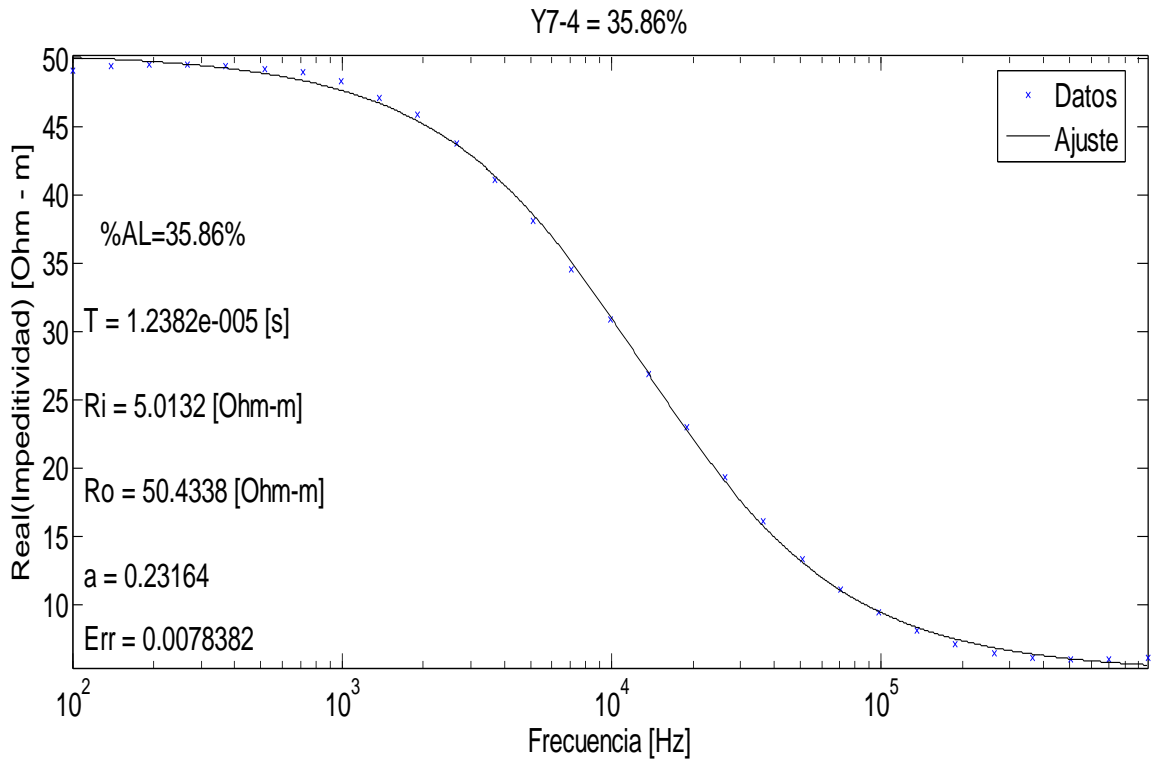


No Muestra (Peso Total de la muestra):	Muestra No 7 (2780 gr)						
GE [%](Para toda la muestra):	37.56%AL						
ARCHIVO IM6	y7310	y7316	y7313r	y7315	y7317	y7318	y7319
Ro [Ohms-m]	37.131	53.952	26.343	50.434	51.0076	30.262	25.754
PESO [gr]:	710	420	360	190	500	270	290
Serie de Identificación	Y7_1	Y7_2	Y7_3	Y7_4	Y7_5	Y7_6	Y7_8
%AL por Espectrofotometría				35.86%			

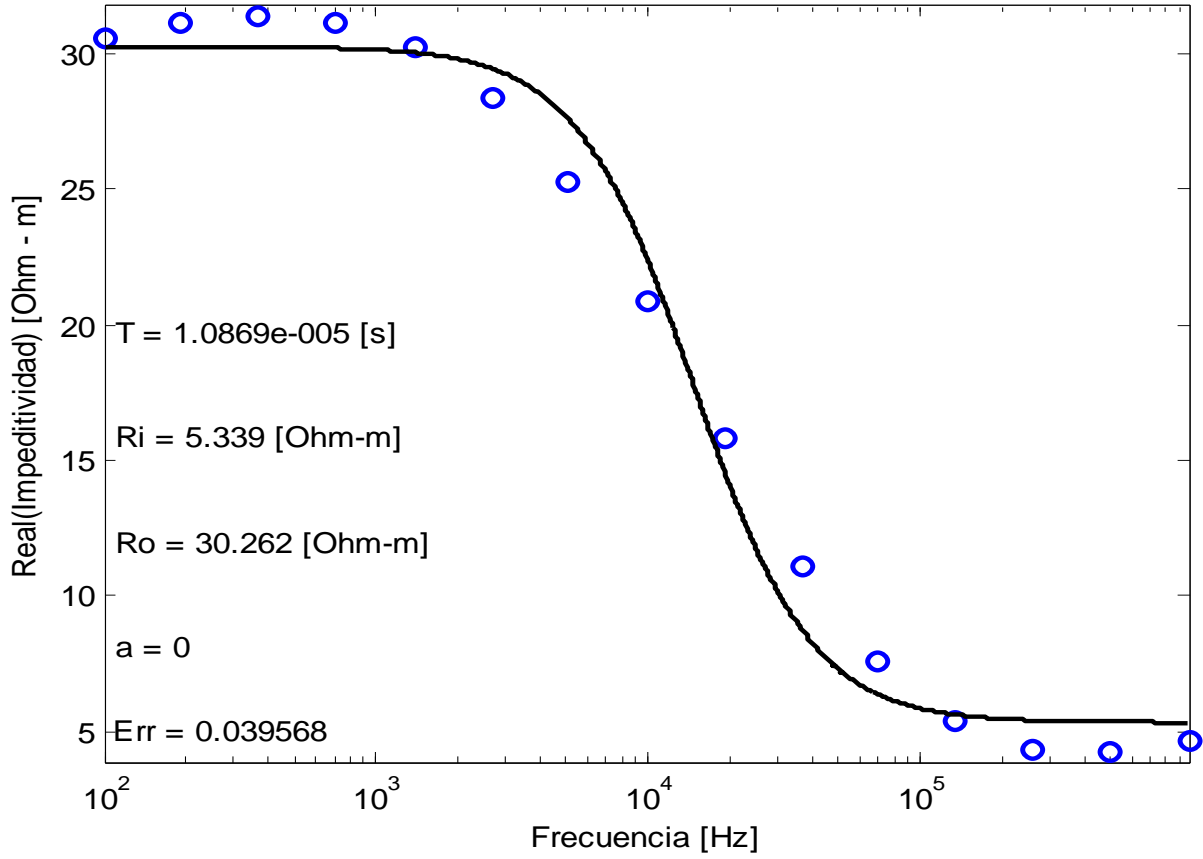


Y7-2 = 37.56%

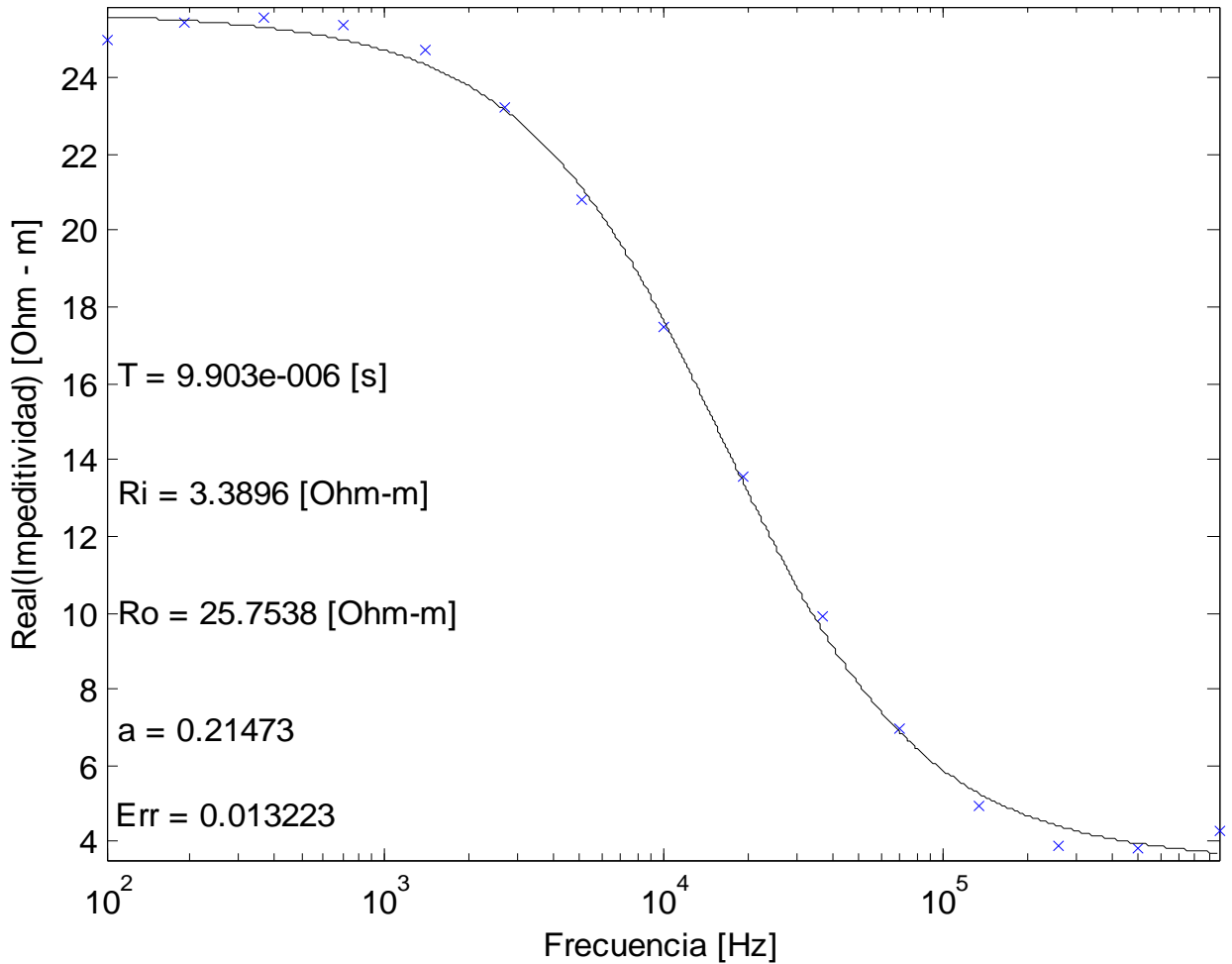




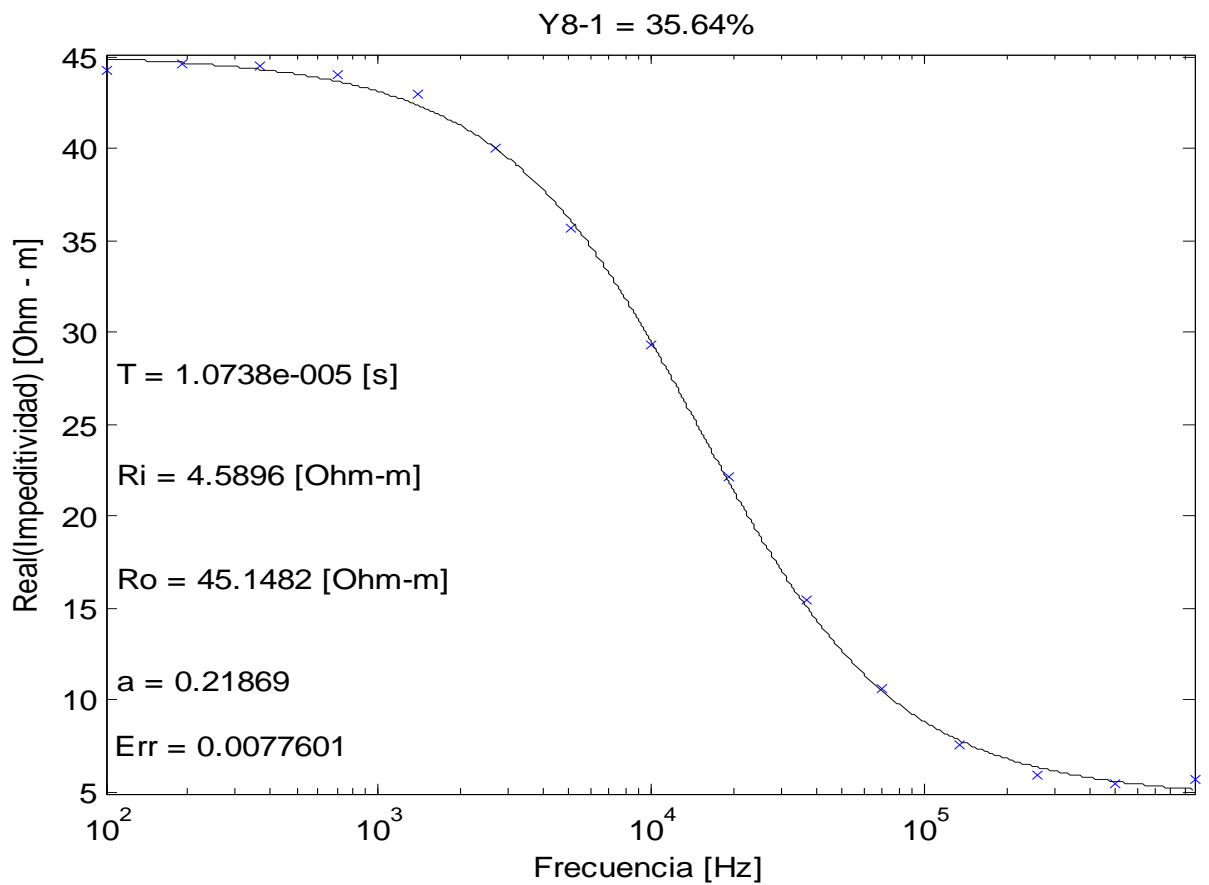
Y7-6 = 37.56%



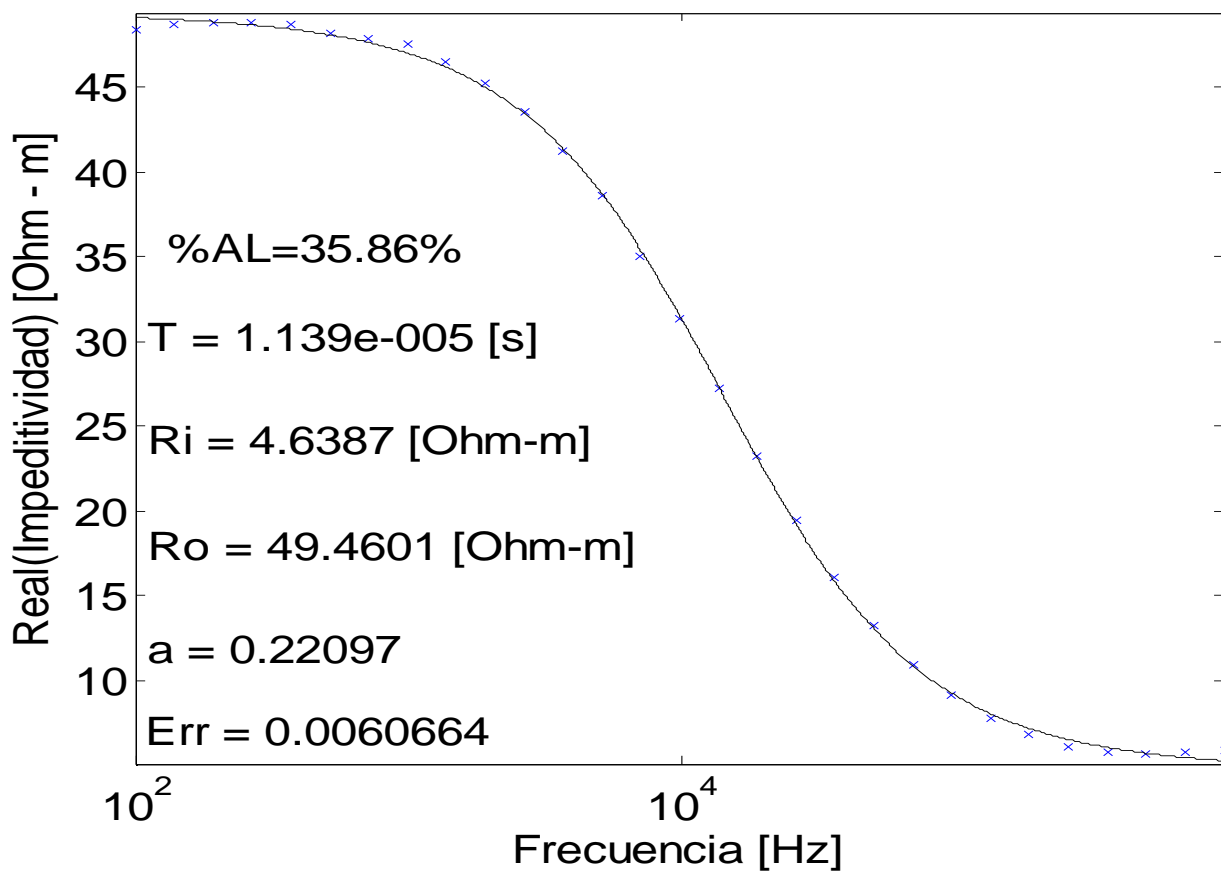
Y7-8 = 37.56%



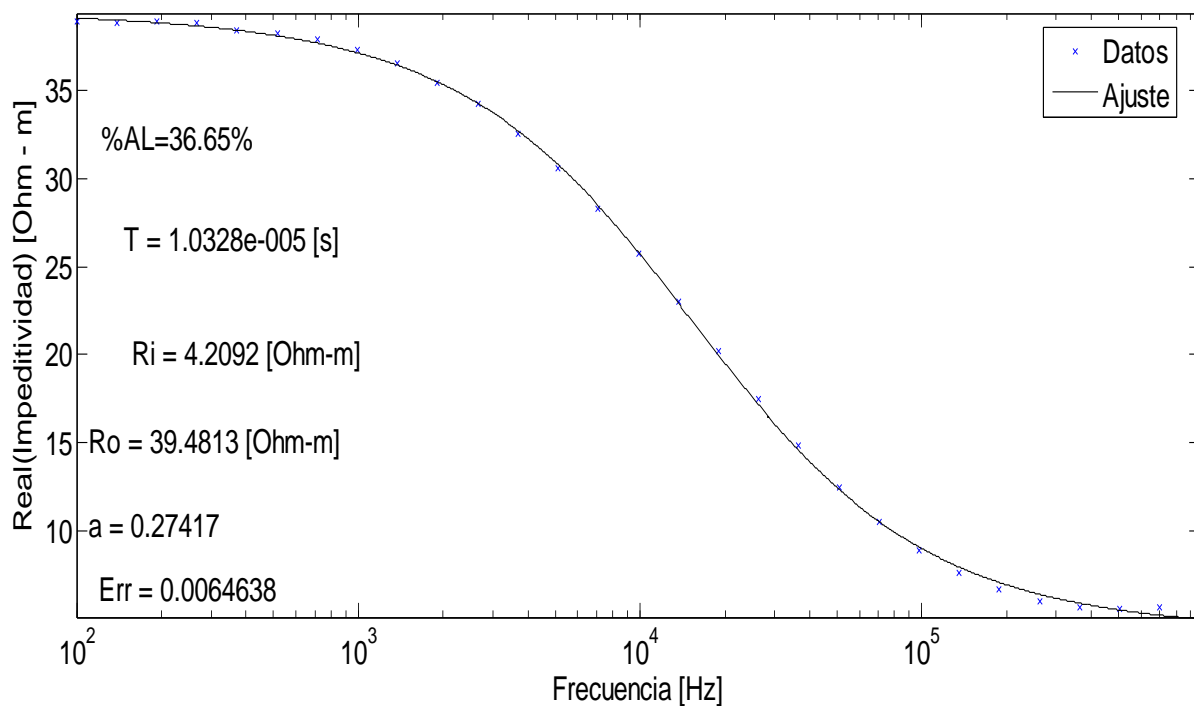
No Muestra (Peso Total de la muestra):	Muestra No 8 (3200 gr)					
GE [%](Para toda la muestra):	35.64%					
ARCHIVO IM6	y73120	y73121	y7322	y7323	y7325	y7326
Ro [Ohms-m]	45.148	49.4601	39.481	40.962	34.688	55.688
PESO [gr]:	600	550	470	340	570	650
Serie de Identificación	Y8_1	Y8_2	Y8_3	Y8_4	Y8_5	Y8_6
%AL por Espectrofotometría	ESPF:	35.39%	36.65%			

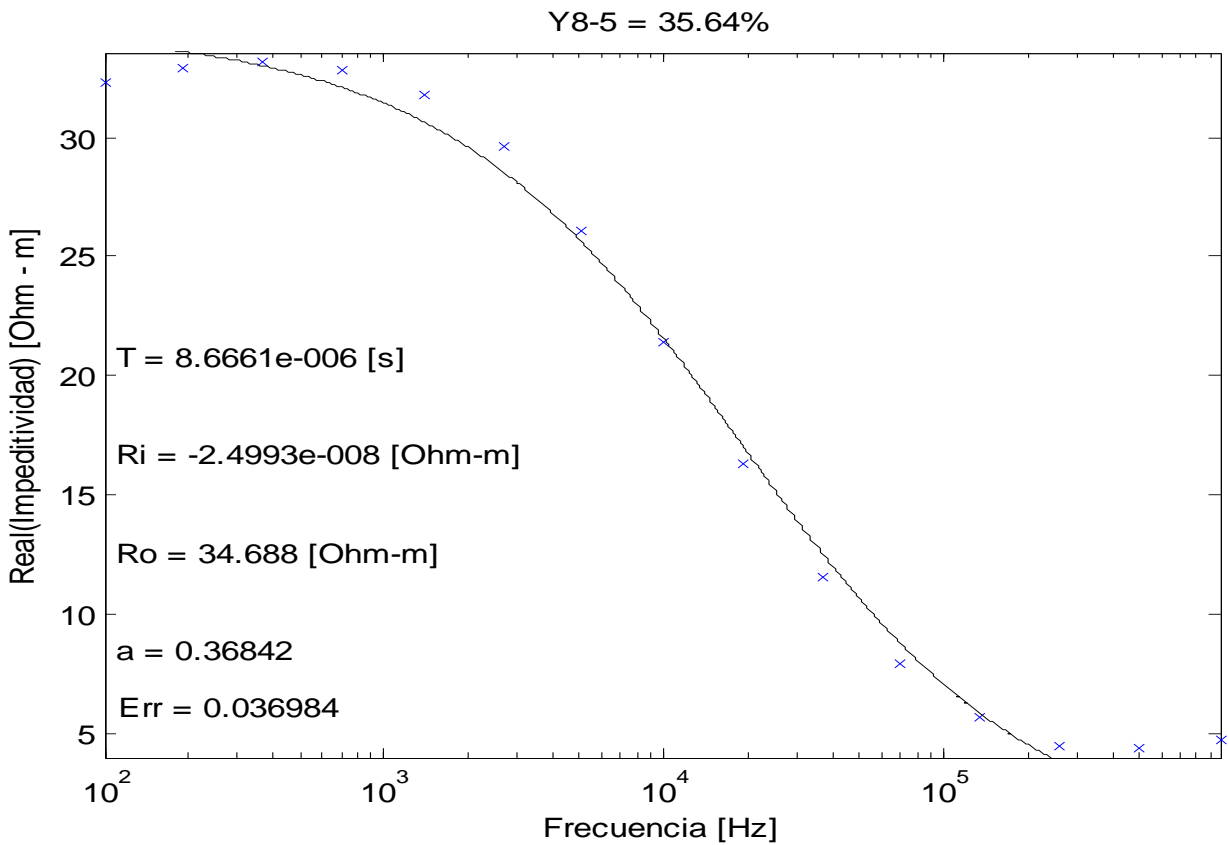
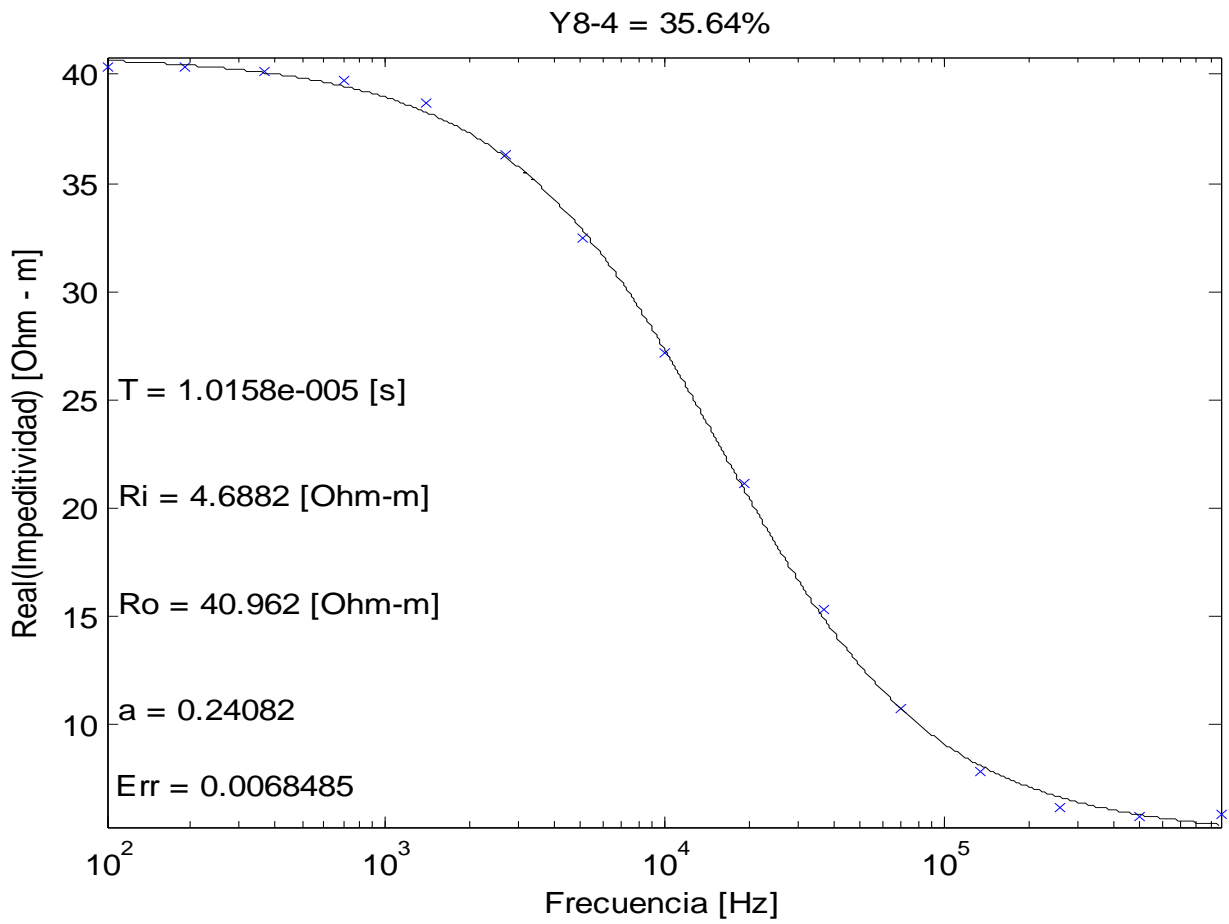


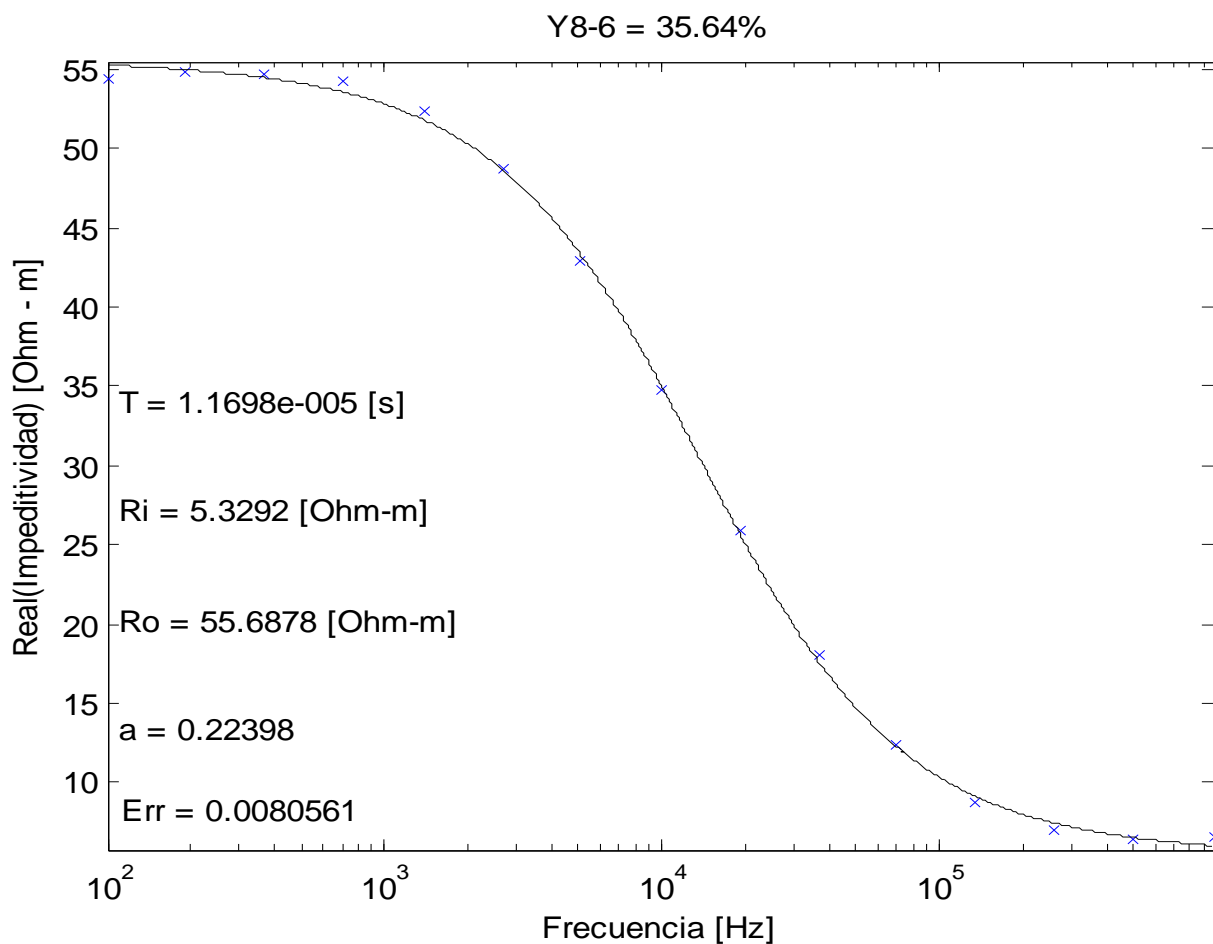
Y8-2 = 35.86%



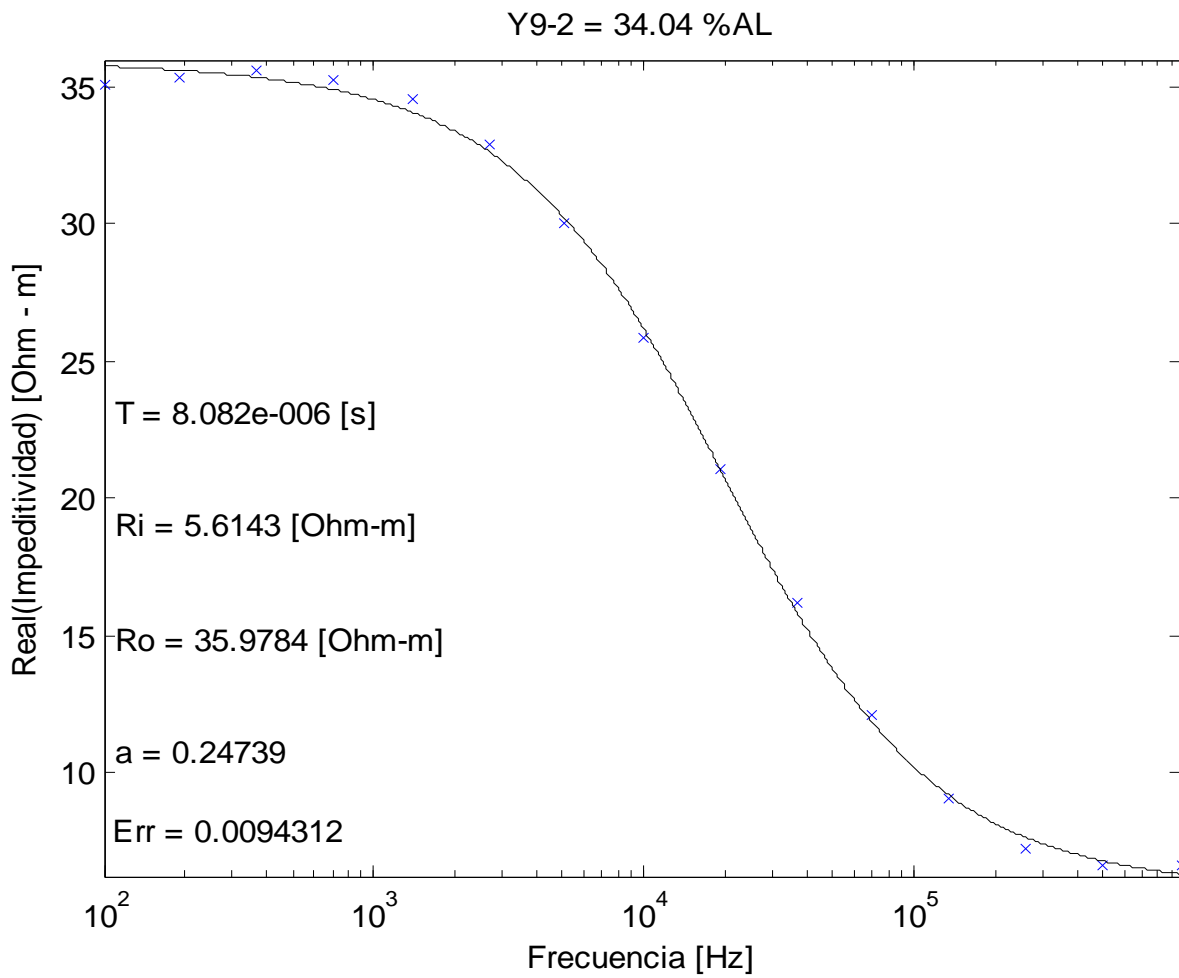
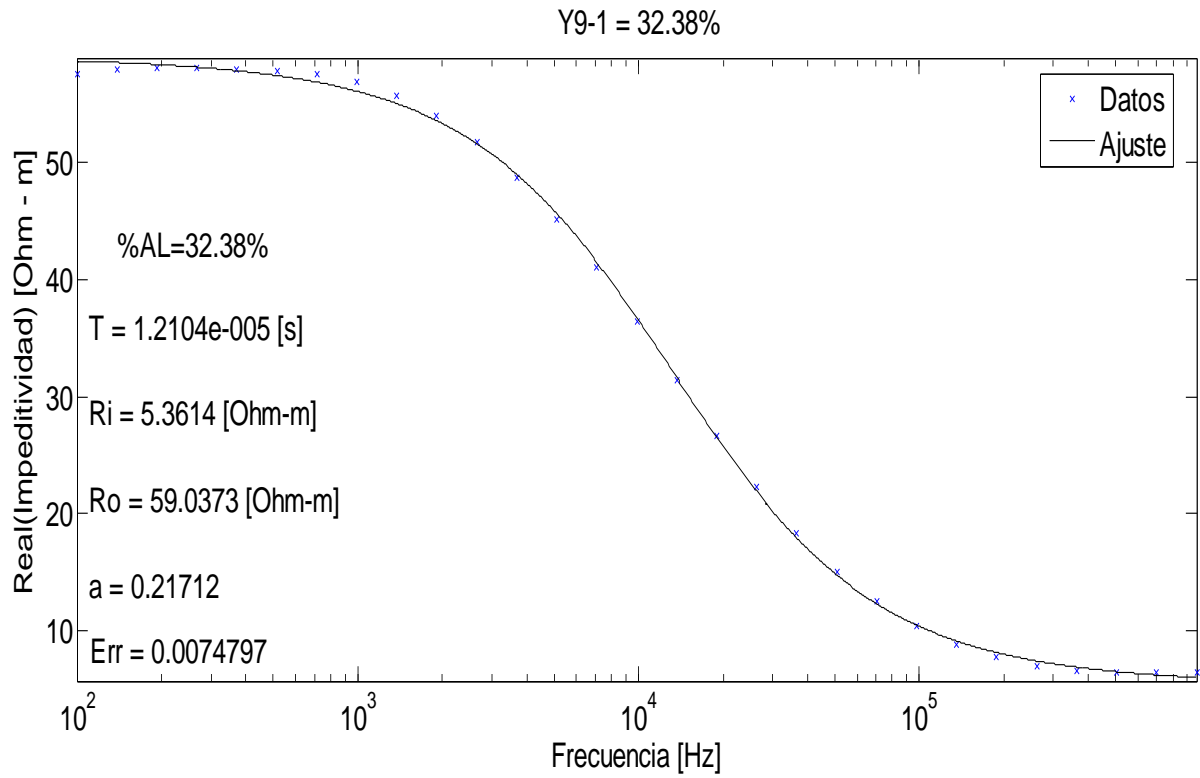
Y8-3 = 36.65%



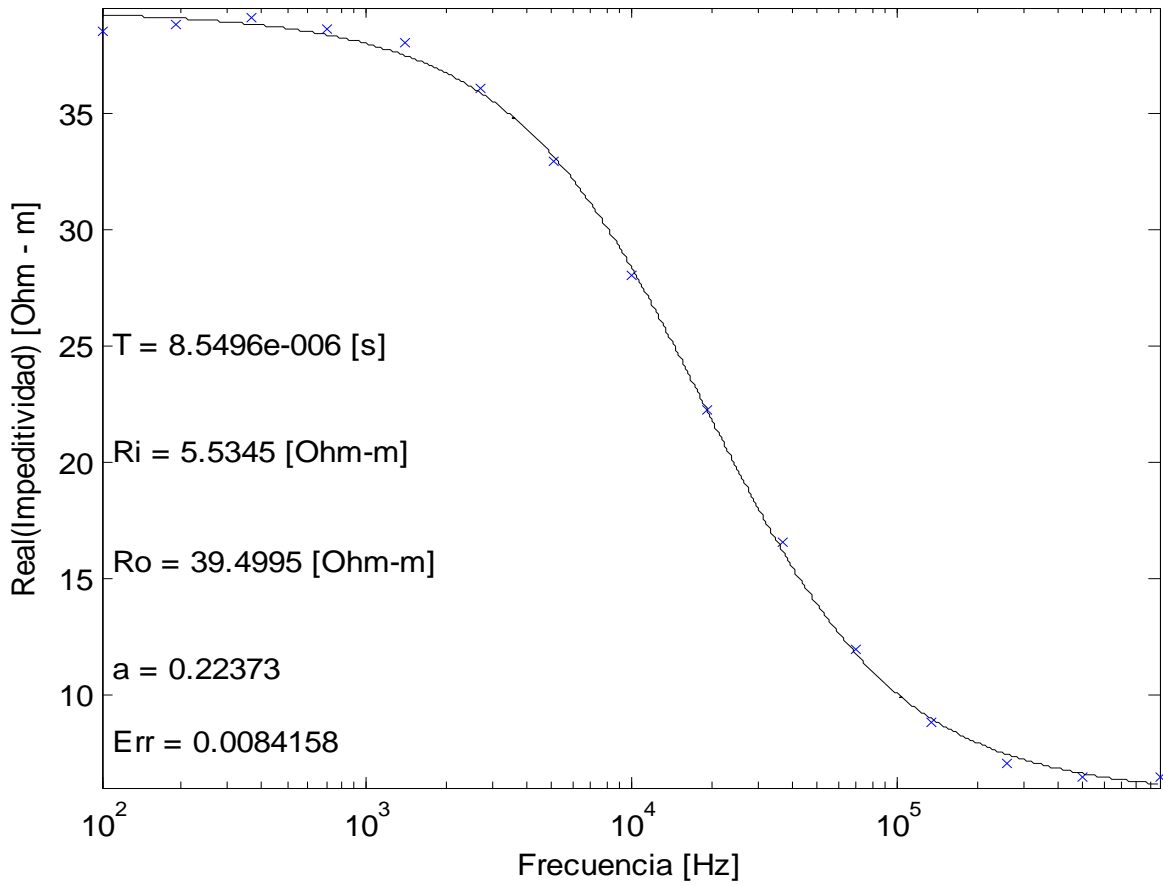




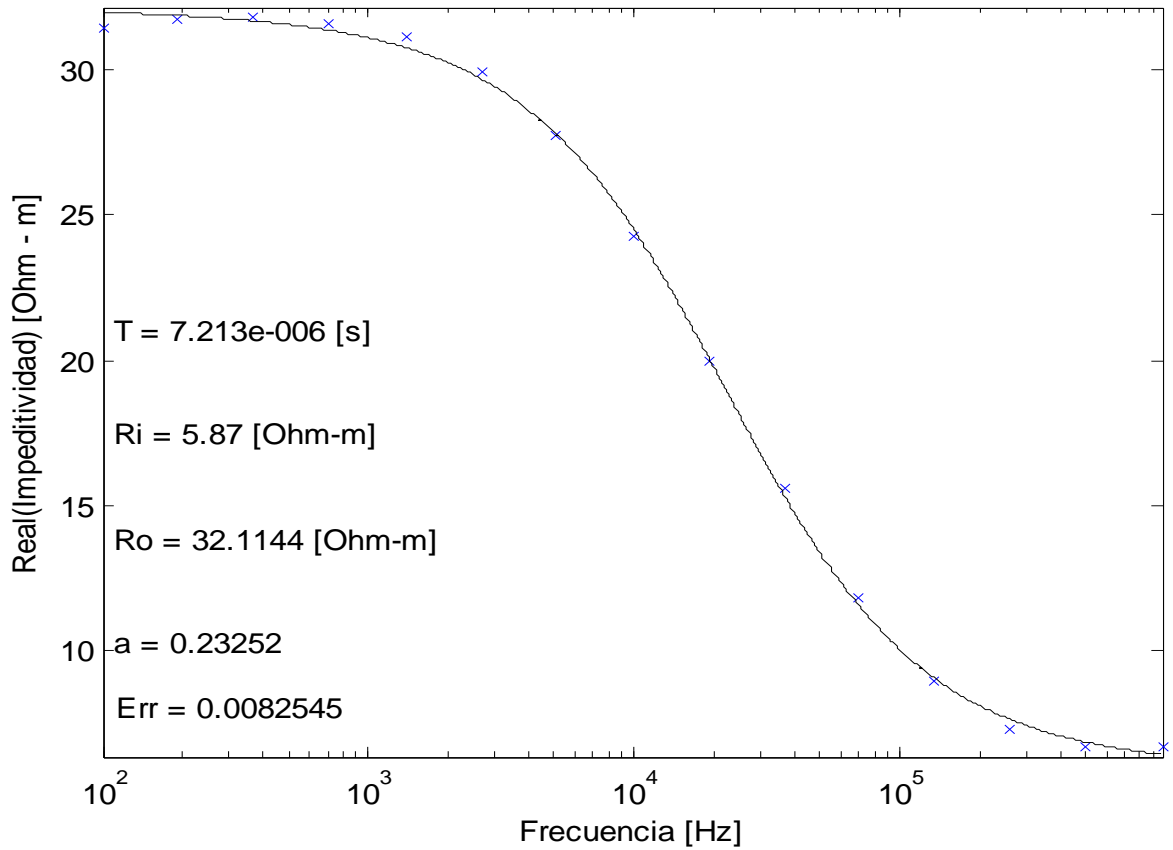
No Muestra (Peso Total de la muestra):	Muestra No 9 (3350 gr)							
GE [%](Para toda la muestra):	34.04%							
ARCHIVO IM6	y7327	y7328	y7329	y7332	y7333	y7334	y7335	y11302
Ro [Ohms-m]	59.037	35.9784	39.5	32.114	34.5497	32.081	30.908	30.5787
PESO [gr]:	540	350	360	400	370	510	310	430
Serie de Identificación	Y9_1	Y9_2	Y9_3	Y9_4	Y9_5	Y9_6	Y9_7	Y9_8
%AL por Espectrofotometría	32.38%							



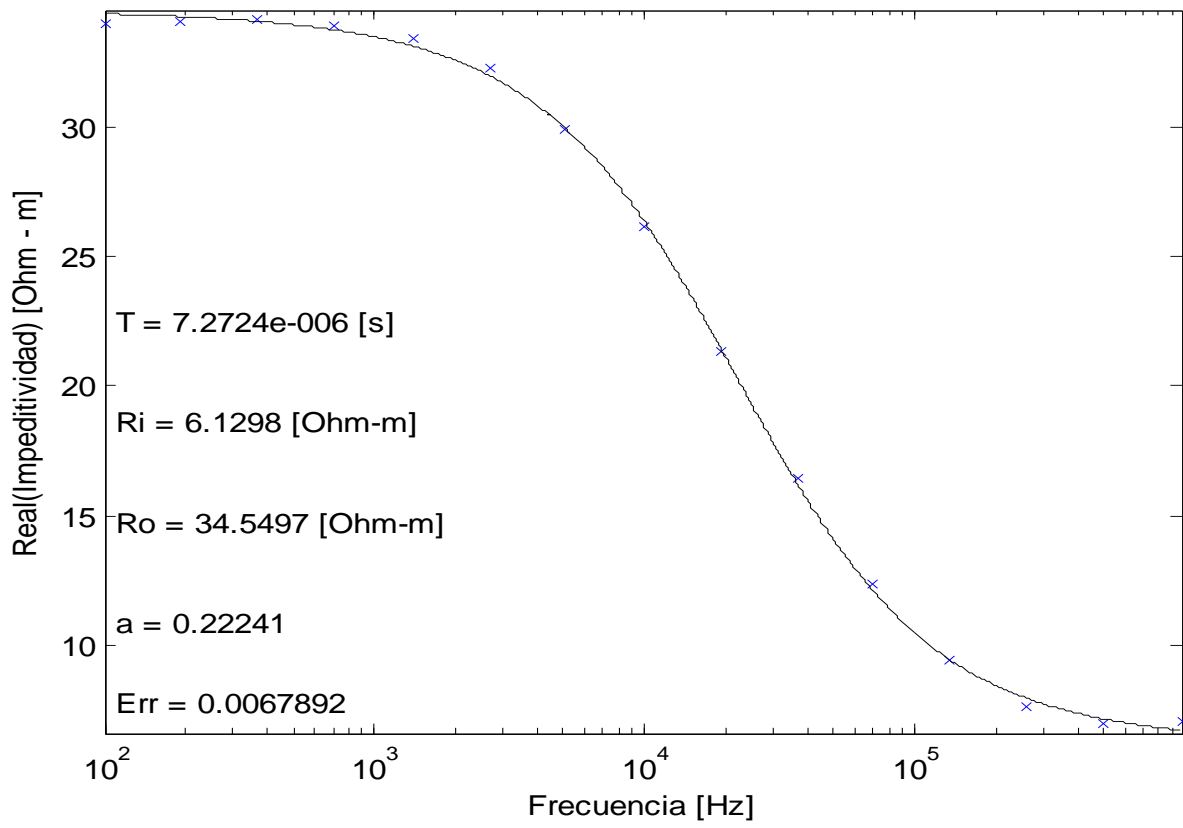
Y9-3 = 34.04 %AL



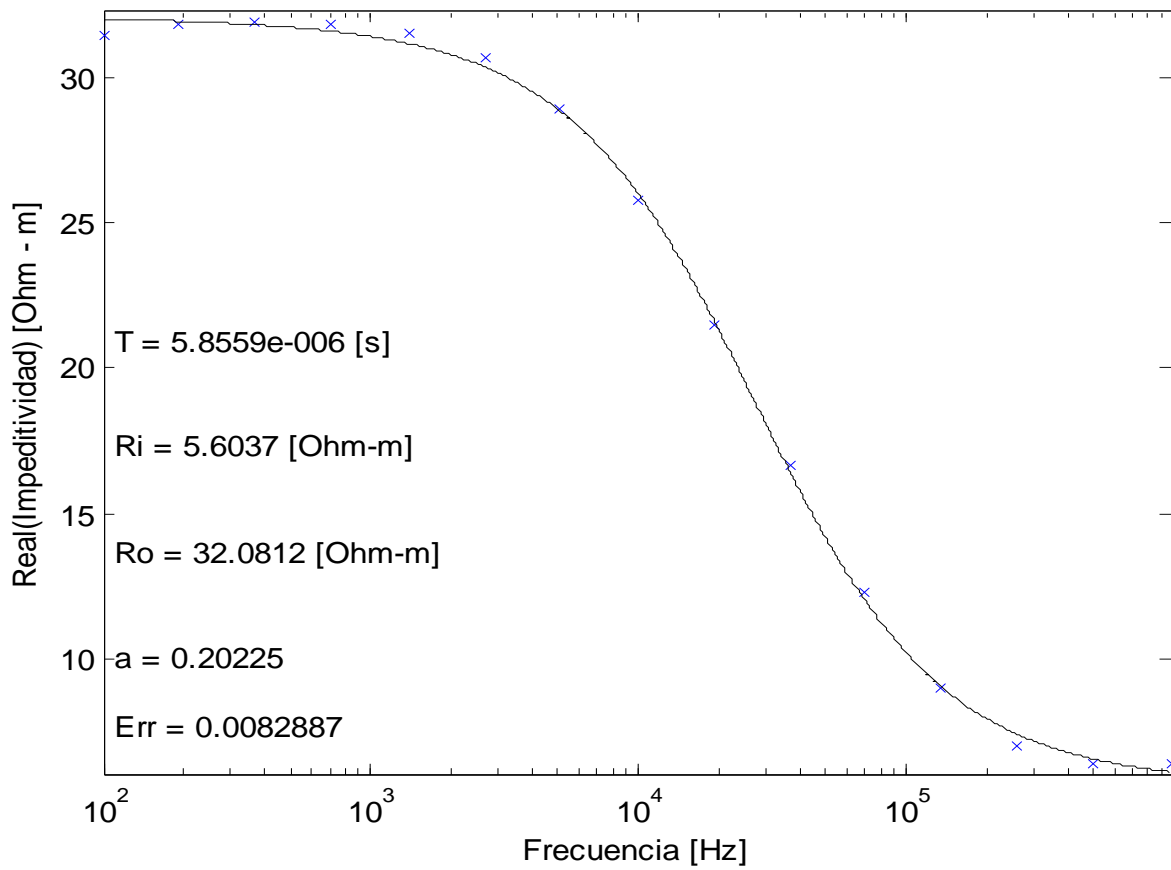
Y9-4 = 34.04 %AL



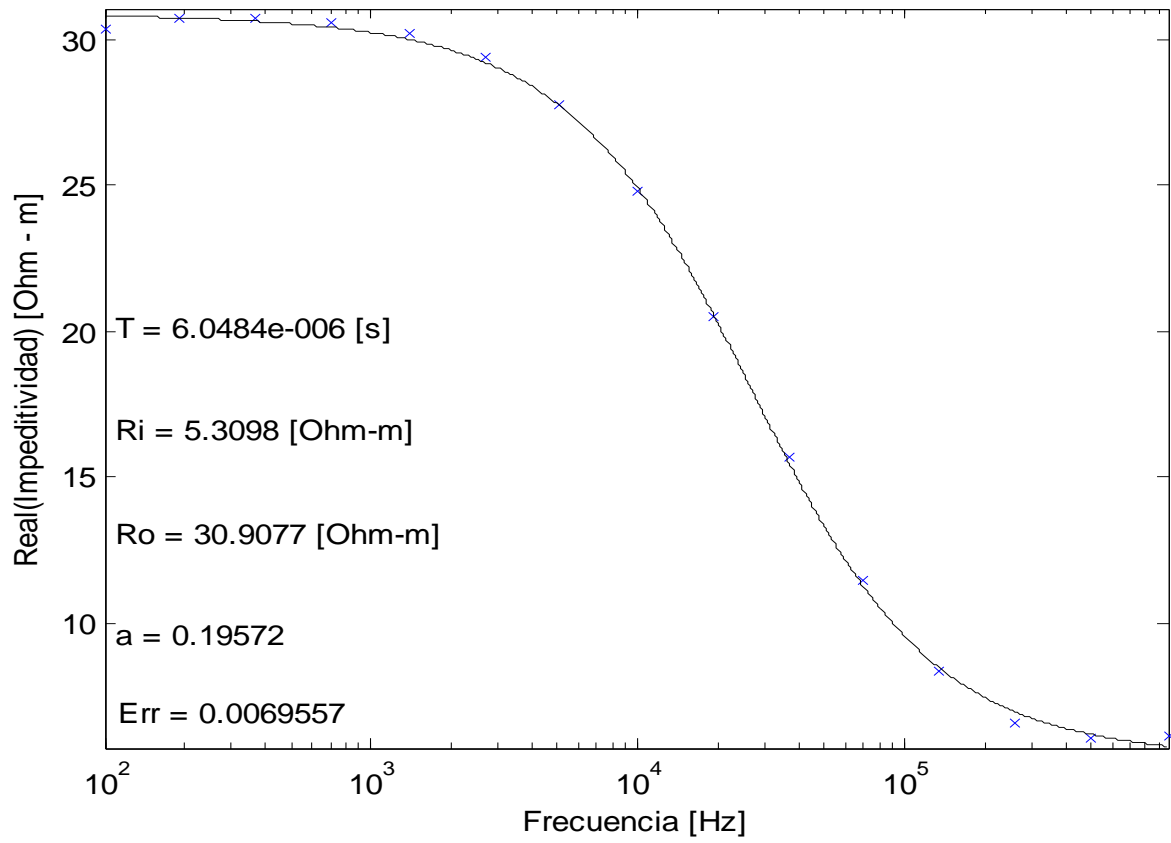
Y9-5 = 34.04 %AL



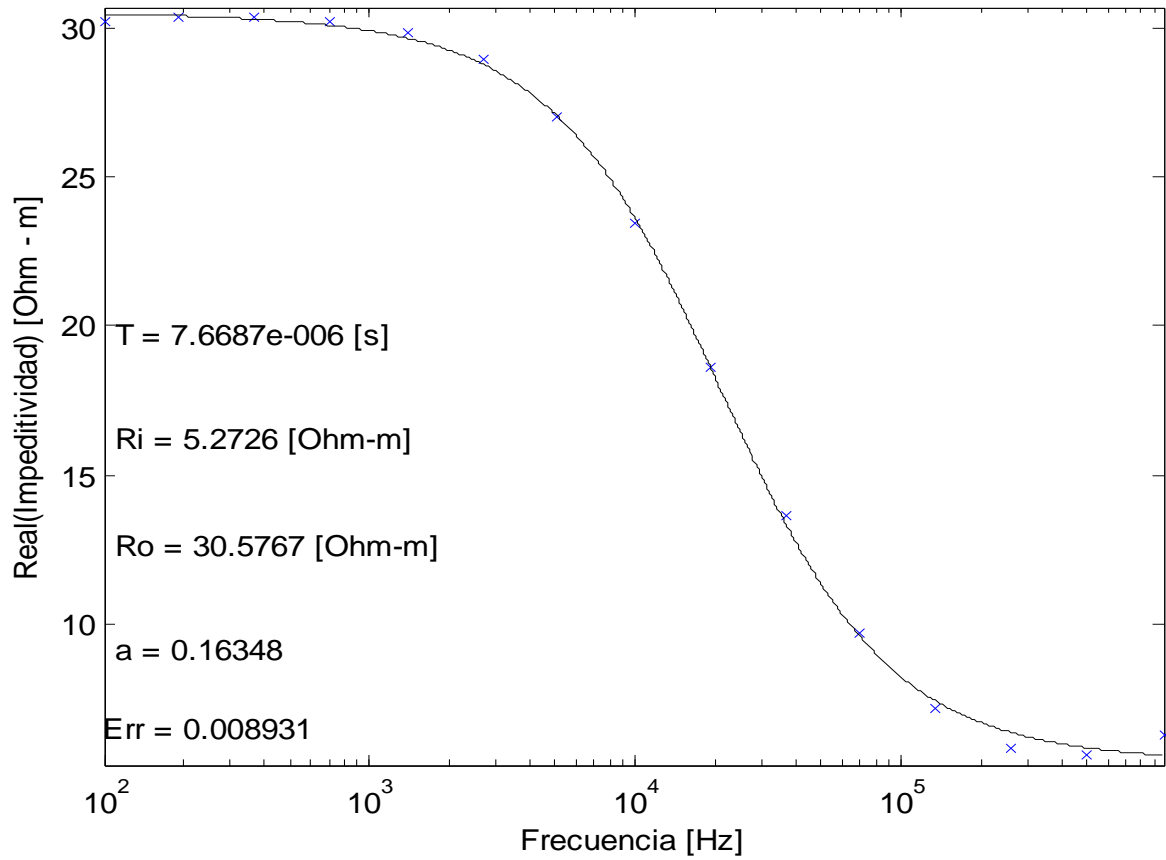
Y9-6 = 34.04 %AL



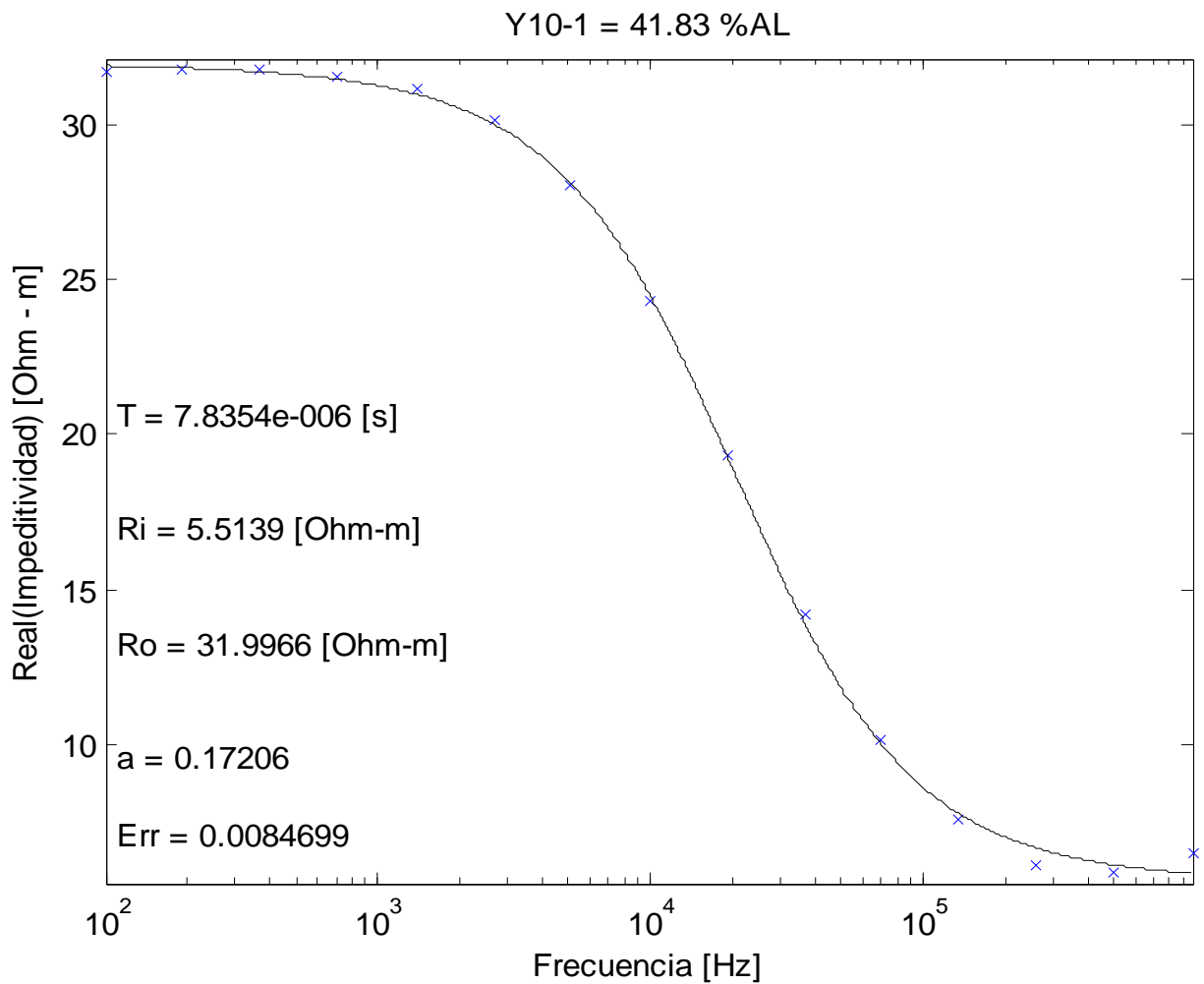
Y9-7 = 34.04 %AL

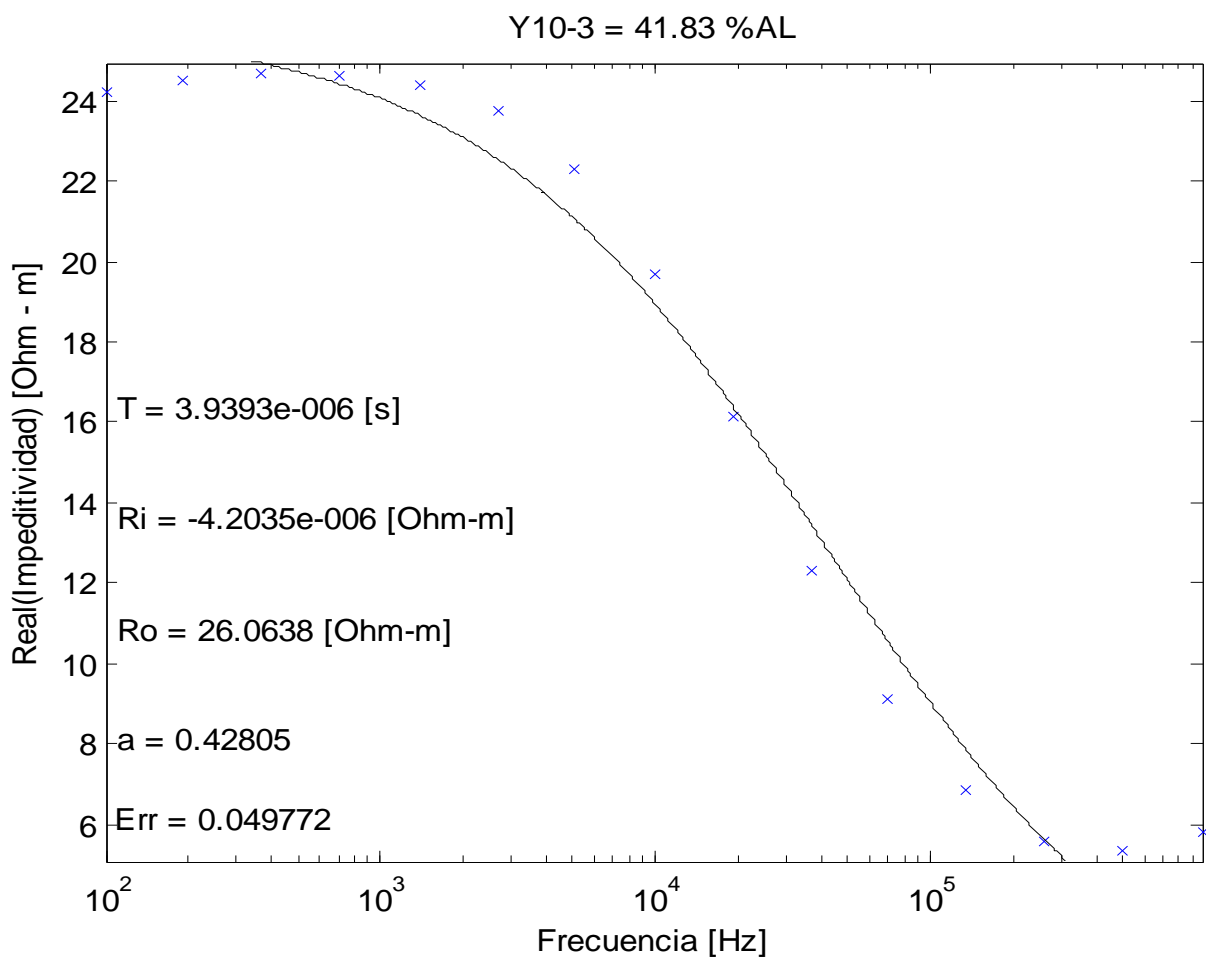
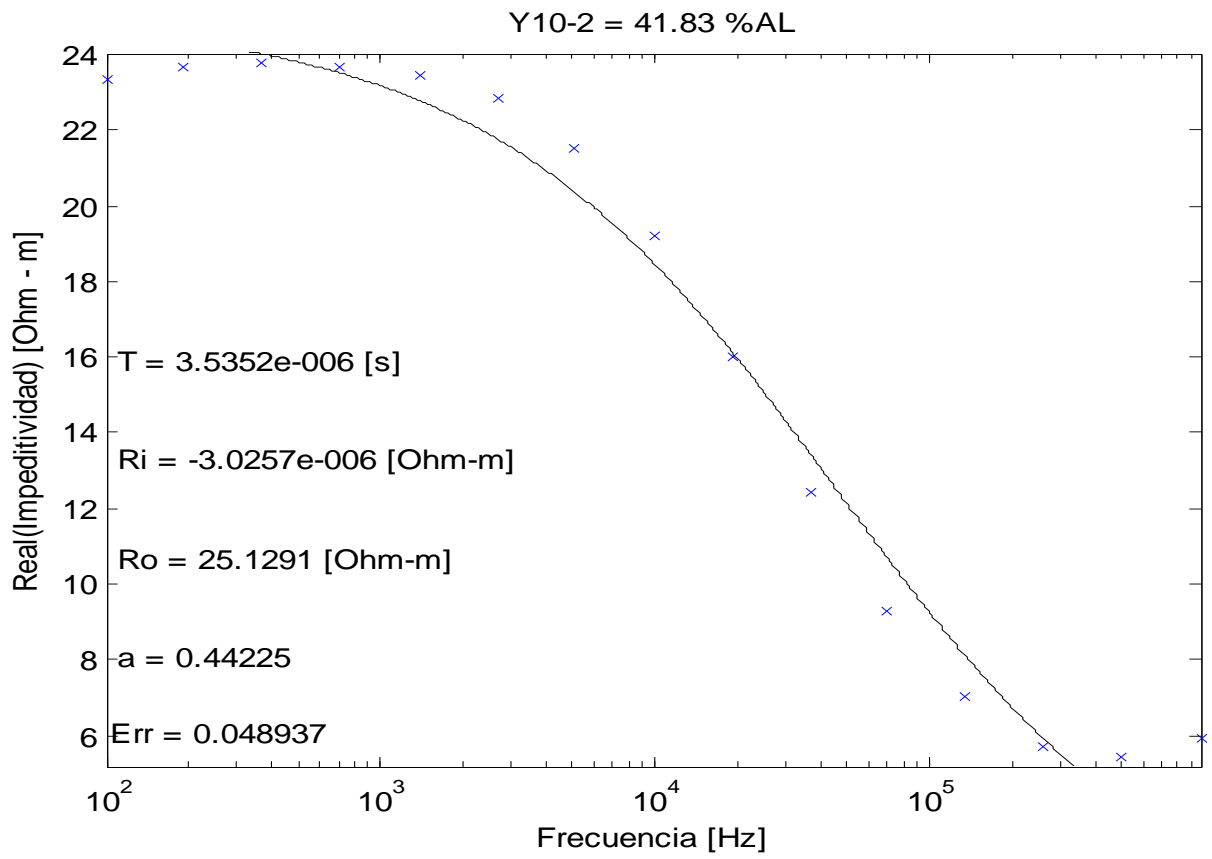


Y9-8 = 34.04 %AL

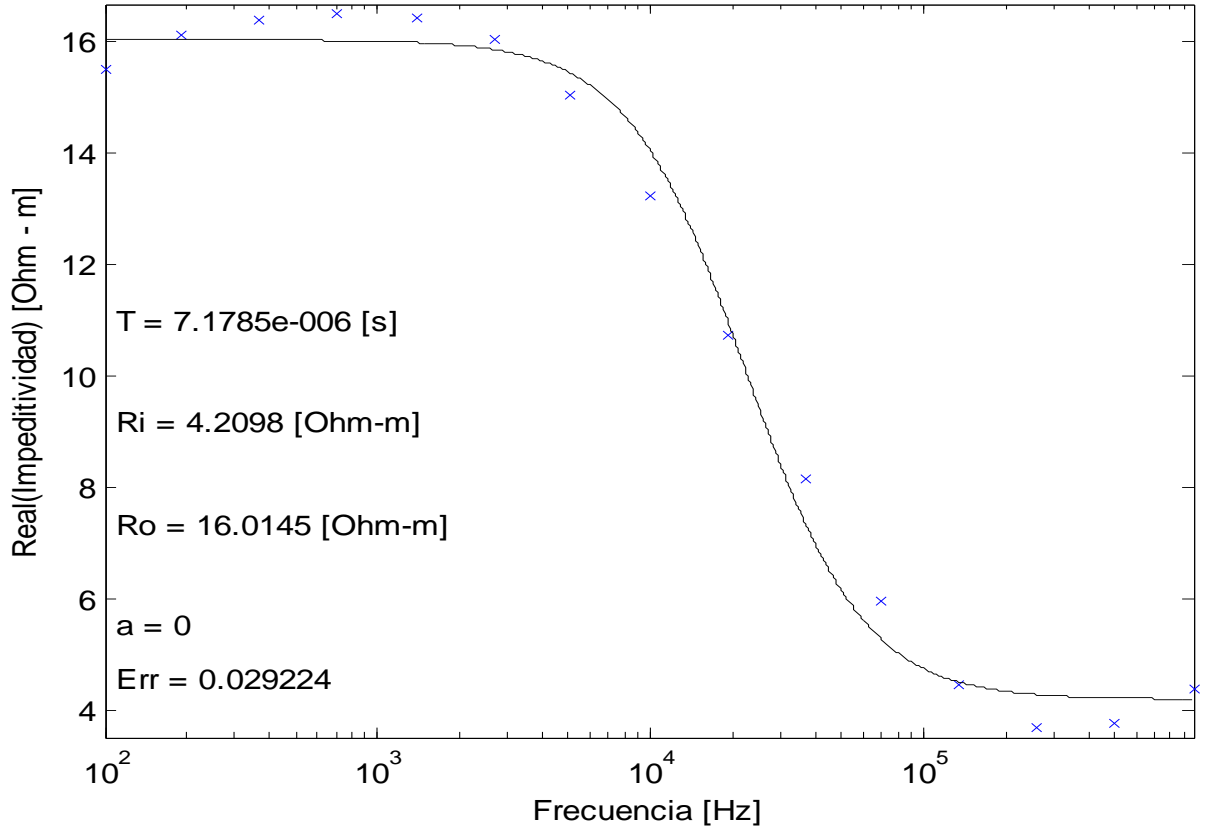


No Muestra (Peso Total de la muestra):	Muestra No 10 (3160 gr)						
GE [%](Para toda la muestra):	41.83%						
ARCHIVO IM6	y11303	y11304	y11305	y11306	y11308	y11310	y11309
Ro [Ohm-m]	31.9966	25.1291	26.0638	16.015	29.7254	27.141	31.2317
PESO [gr]:	400	310	380	520	540	340	650
Serie de Identificación	Y10_1	Y10_2	Y10_3	Y10_4	Y10_5	Y10_6	Y10_7
%AL por Espectrofotometría							

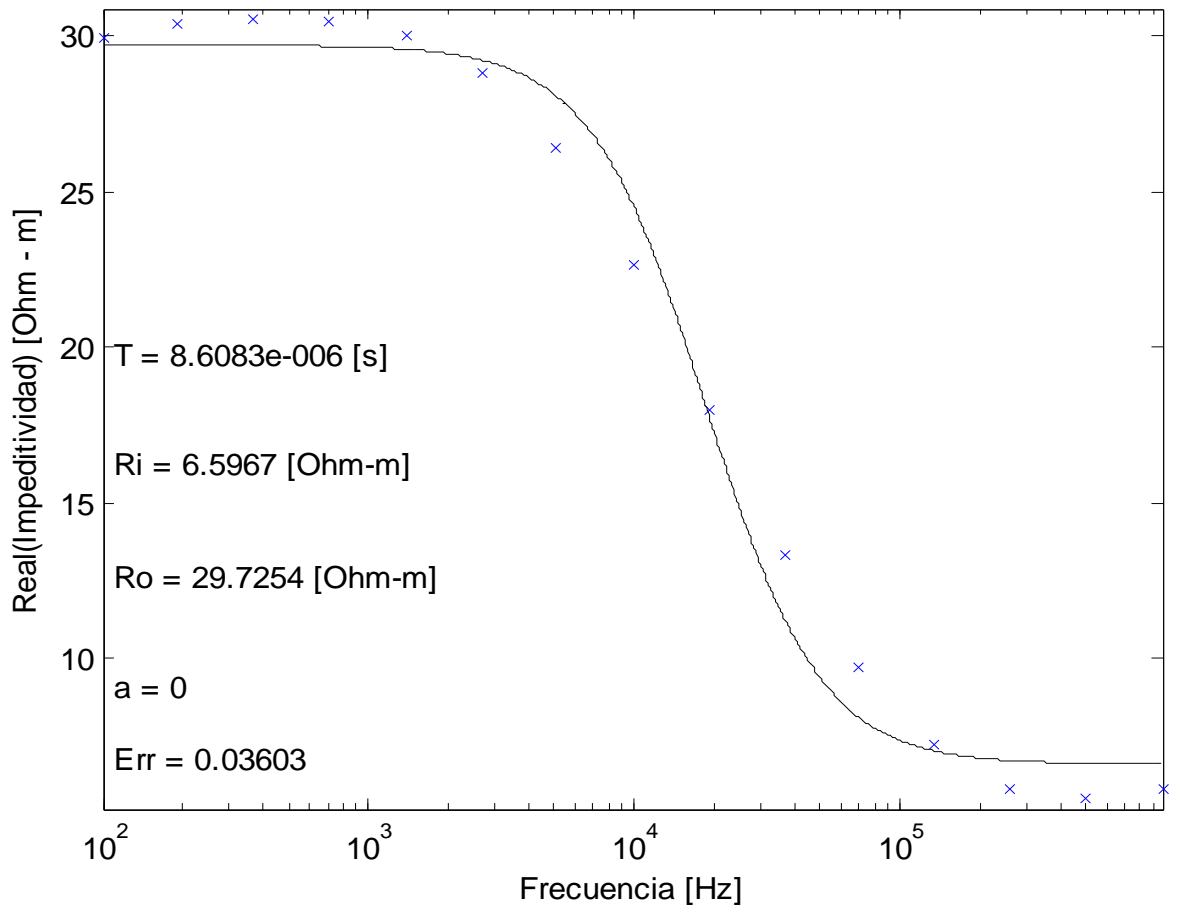


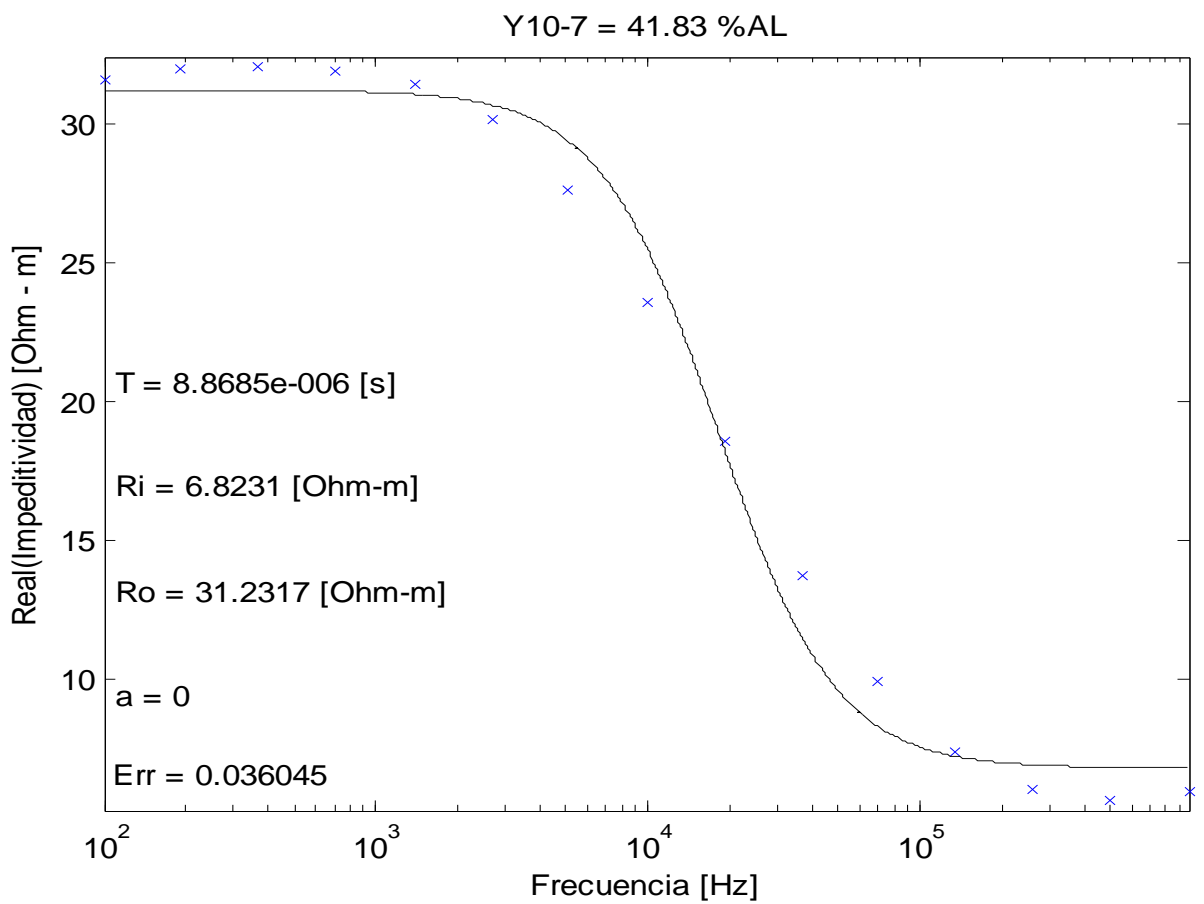
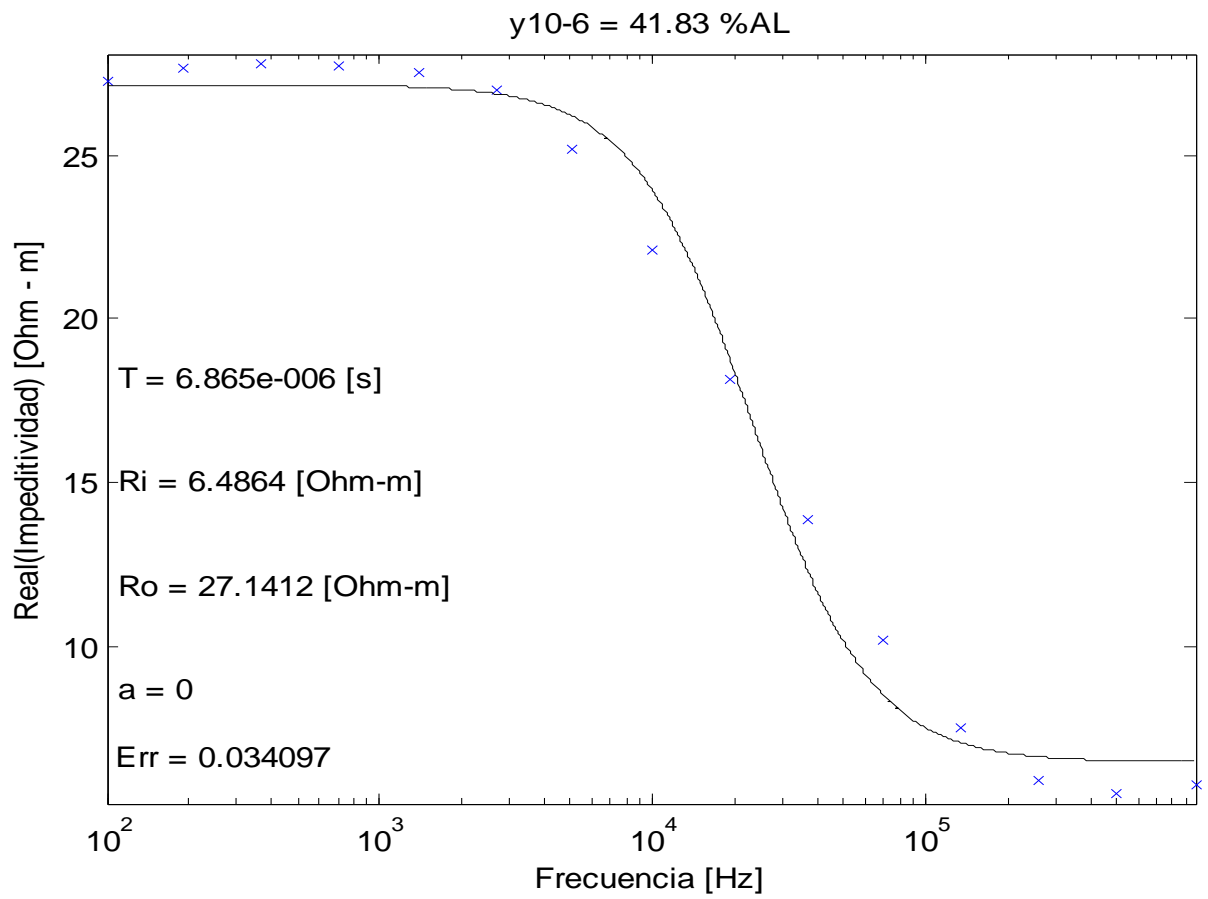


Y10-4 = 41.83 %AL

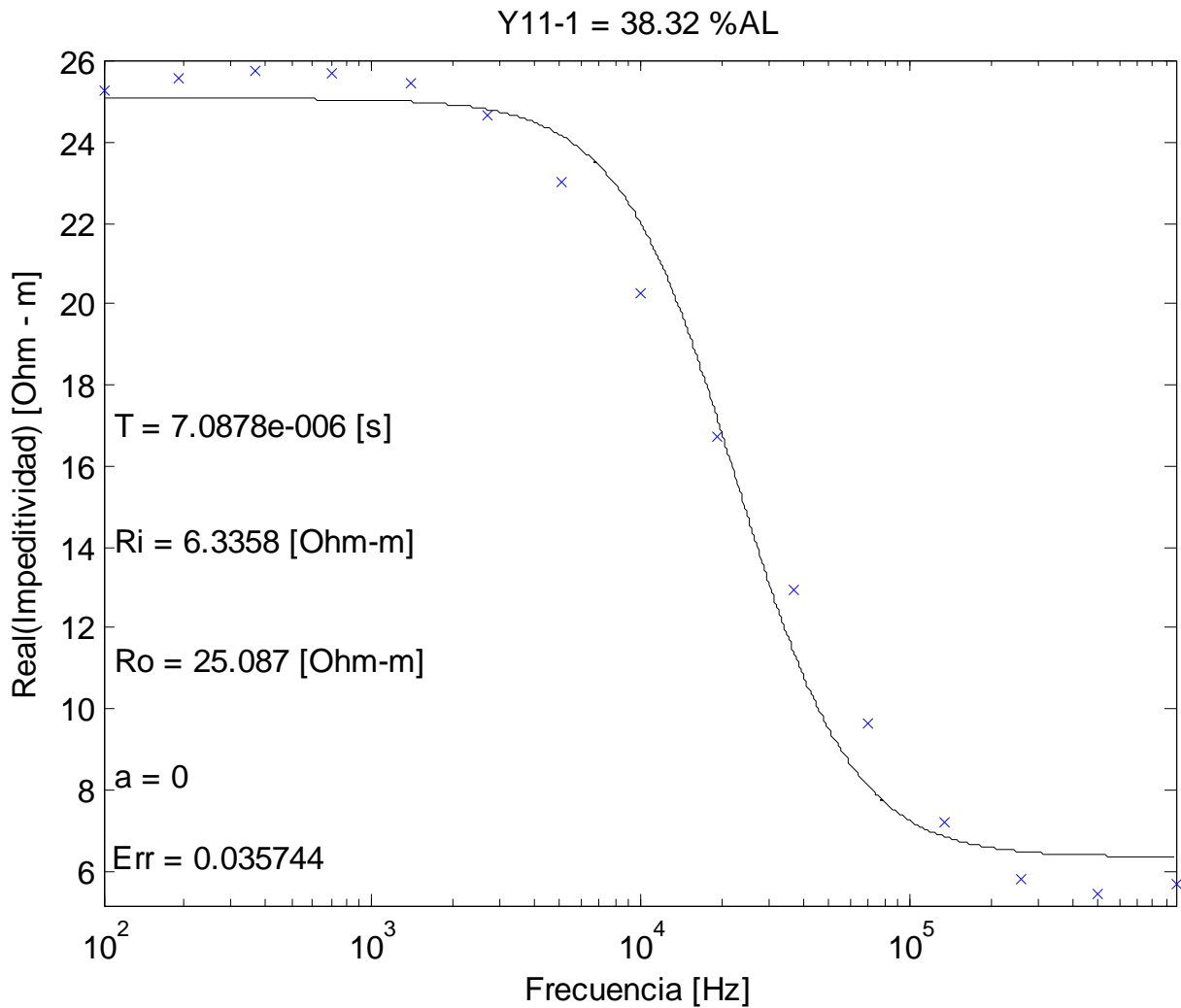


Y10-5 = 41.83 %AL

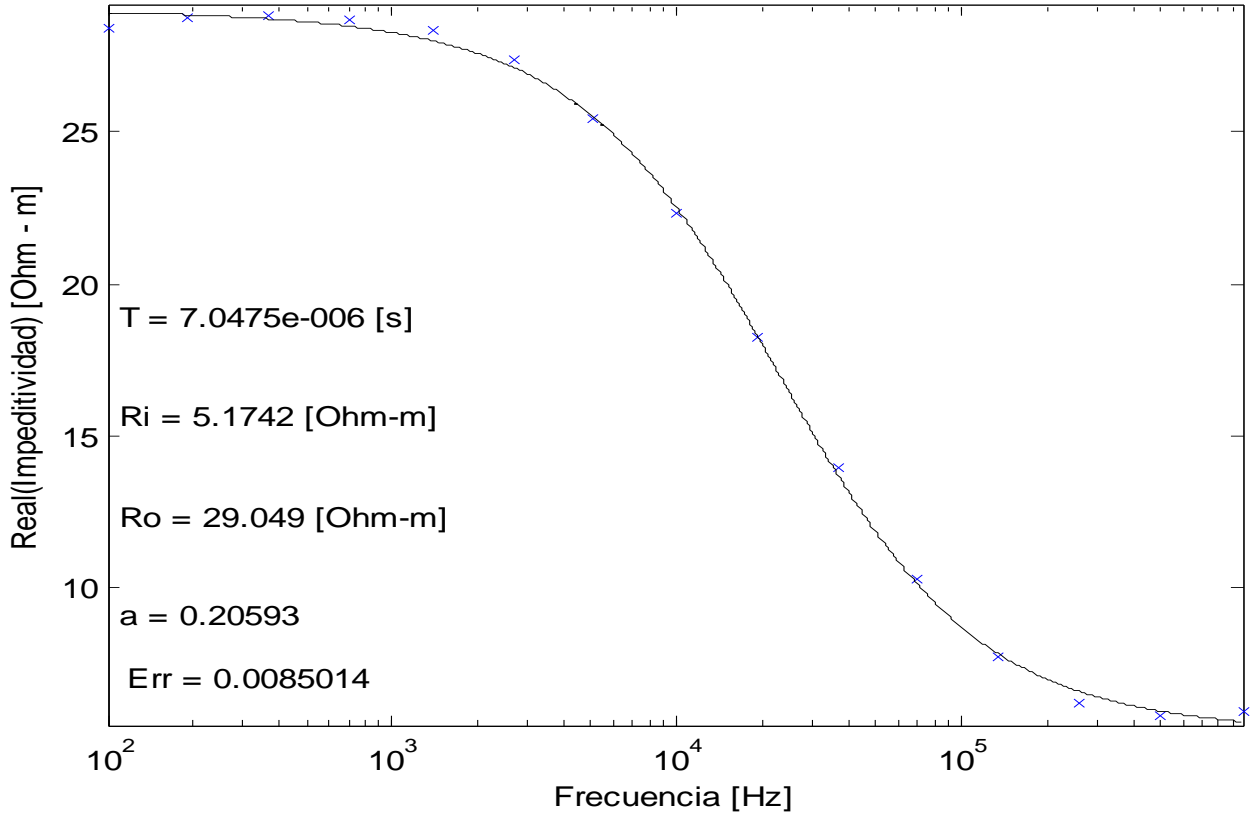




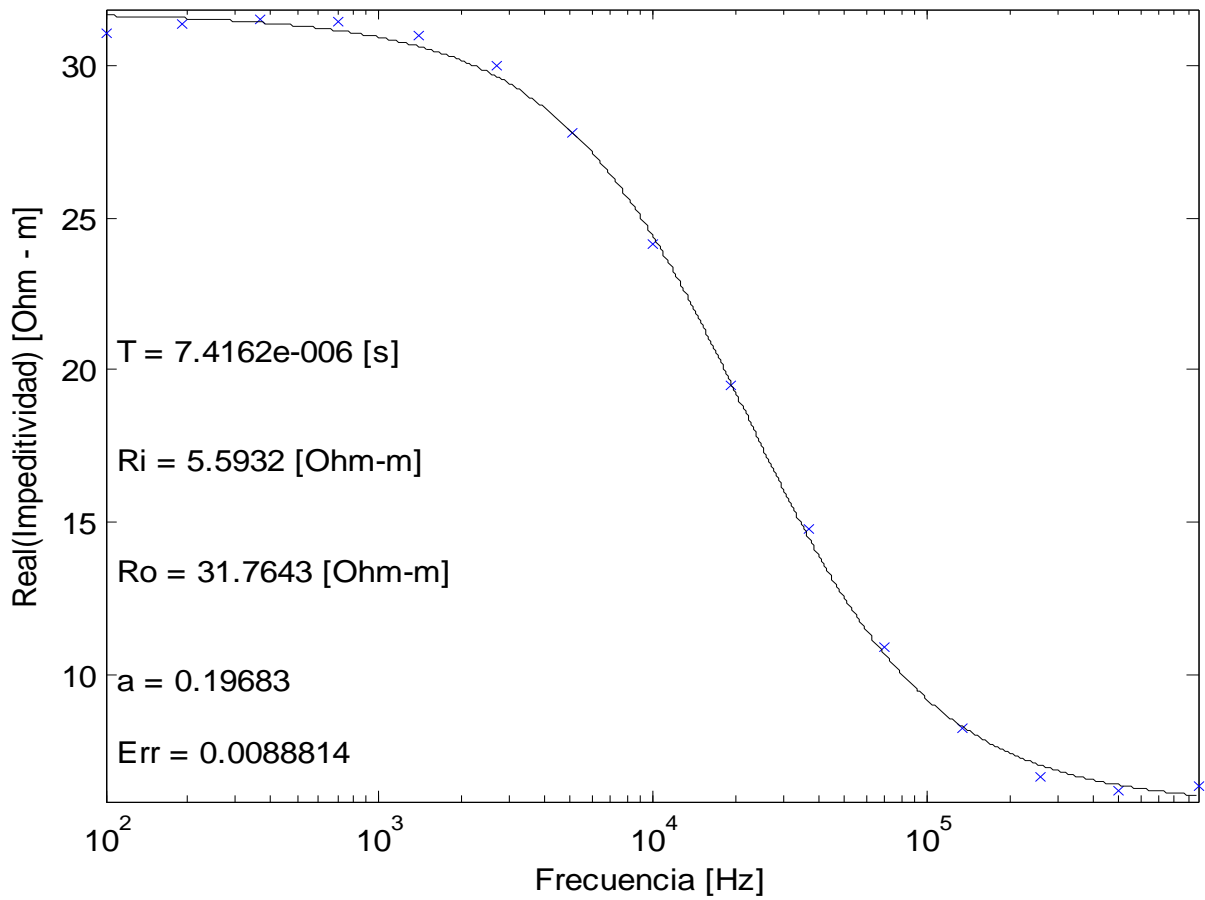
No Muestra (Peso Total de la muestra):	Muestra No 11 (3010 gr)						
GE [%](Para toda la muestra):	38.32%						
ARCHIVO IM6	y11311	y11314	y11315	y11317	y11320	y11321	y11322
Ro [Ohms-m]	25.087	29.049	31.7643	30.154	33.1951	35.087	26.2019
PESO [gr]:	520	140	370	400	510	440	610
Serie de Identificación	Y11_1	Y11_2	Y11_3	Y11_4	Y11_5	Y11_6	Y11_7
%AL por Espectrofotometría							



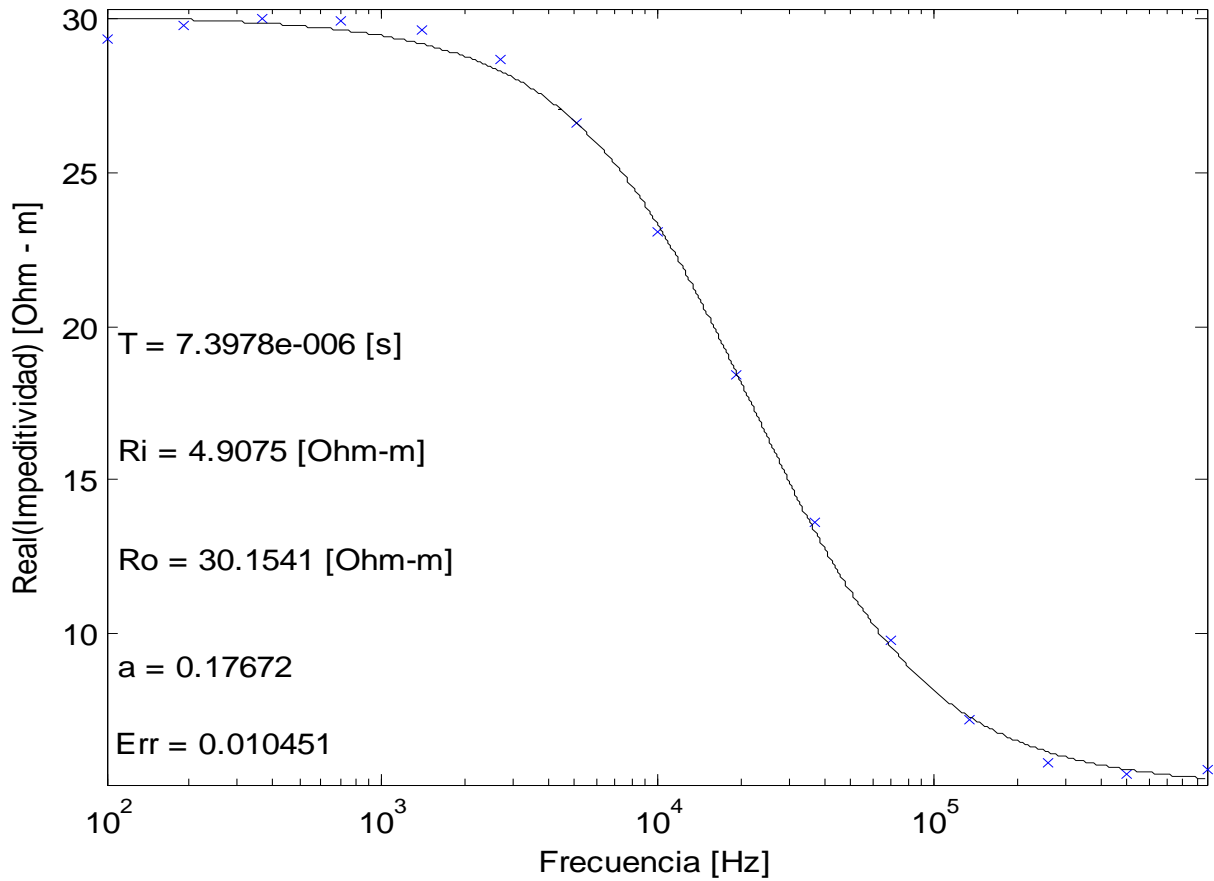
Y11-2 = 38.32 %AL



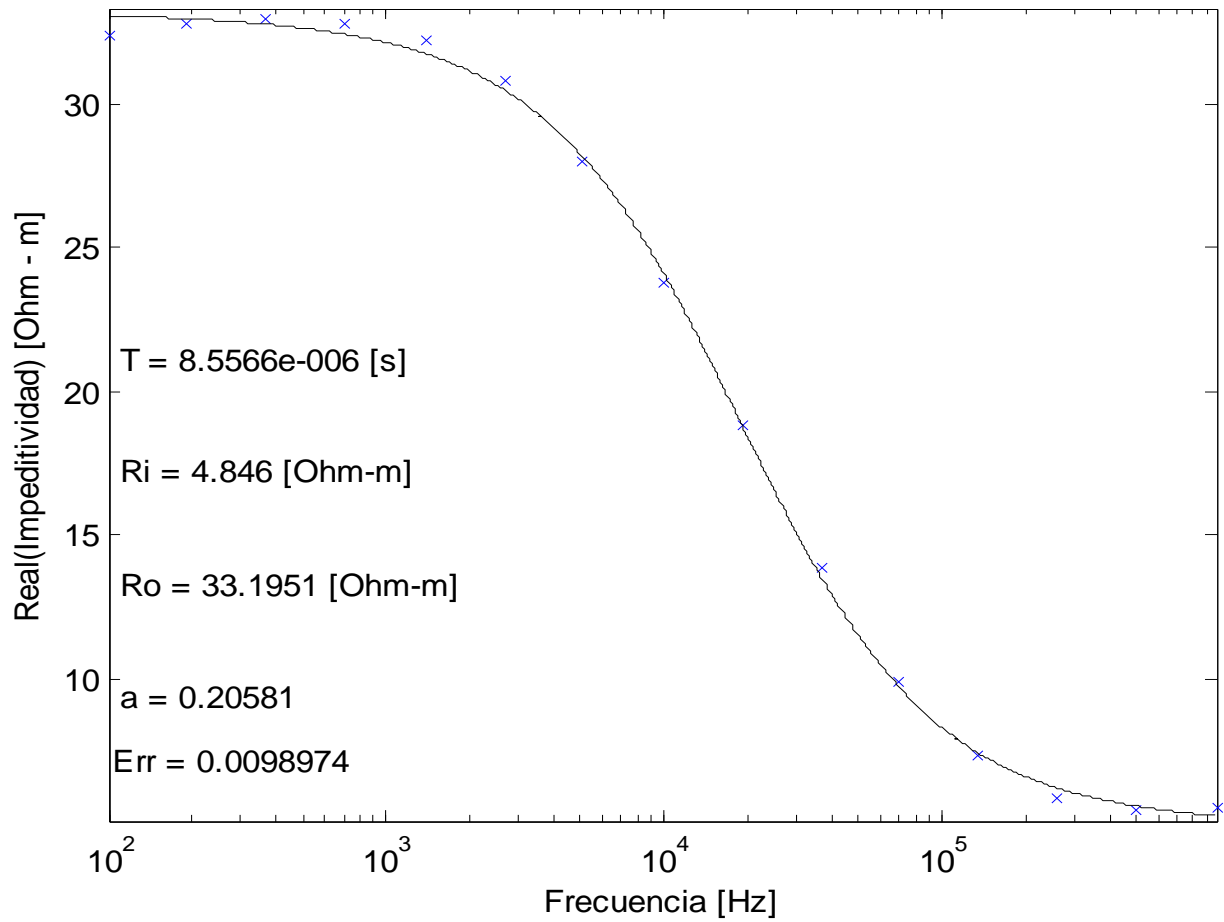
Y11-3 = 38.32 %AL



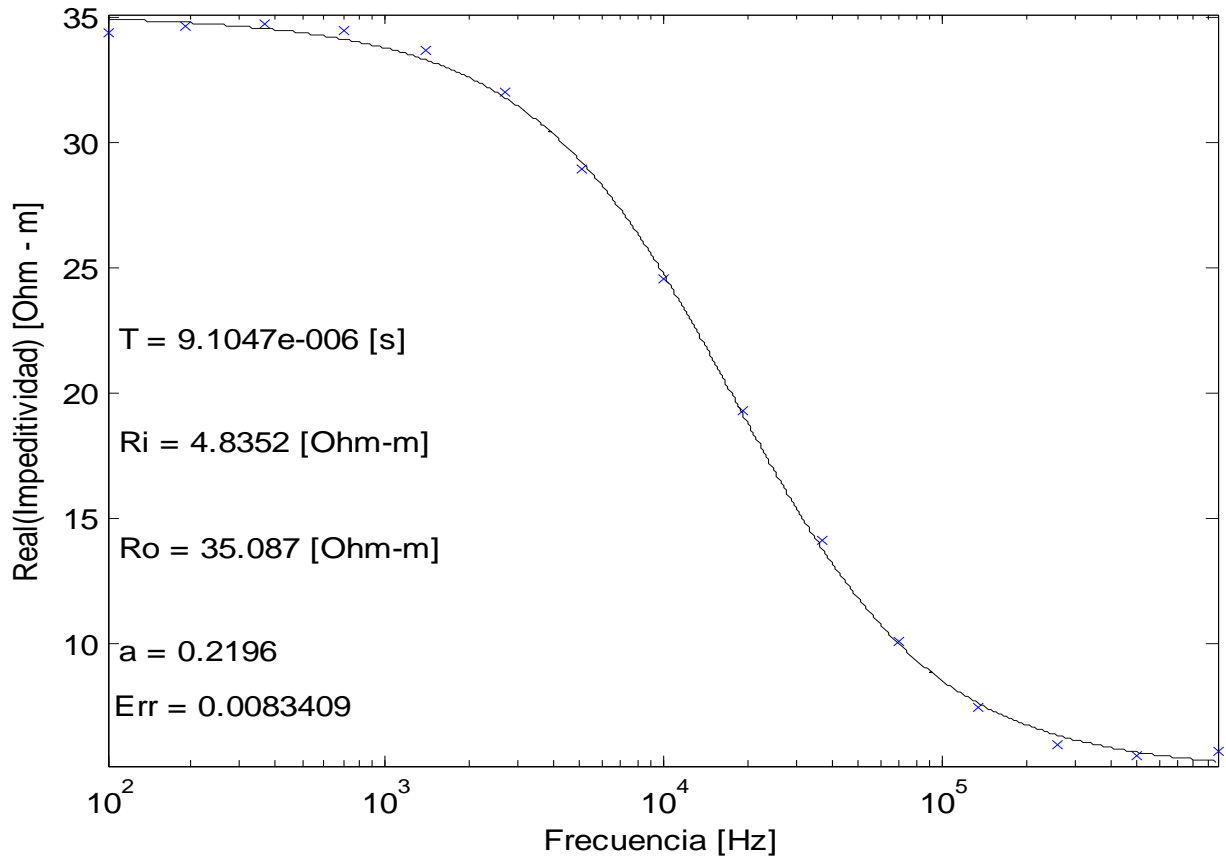
Y11-4 = 38.32 %AL



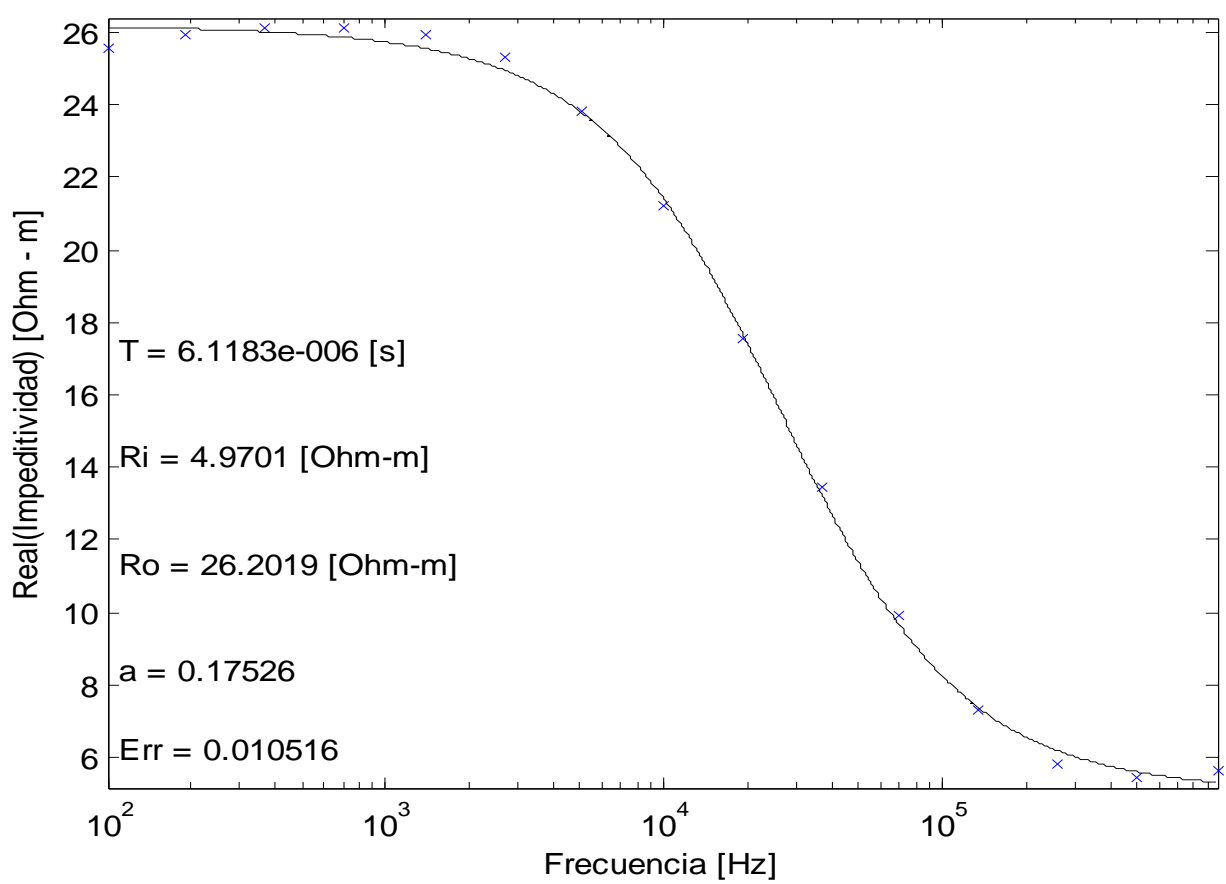
Y11-5 = 38.32 %AL



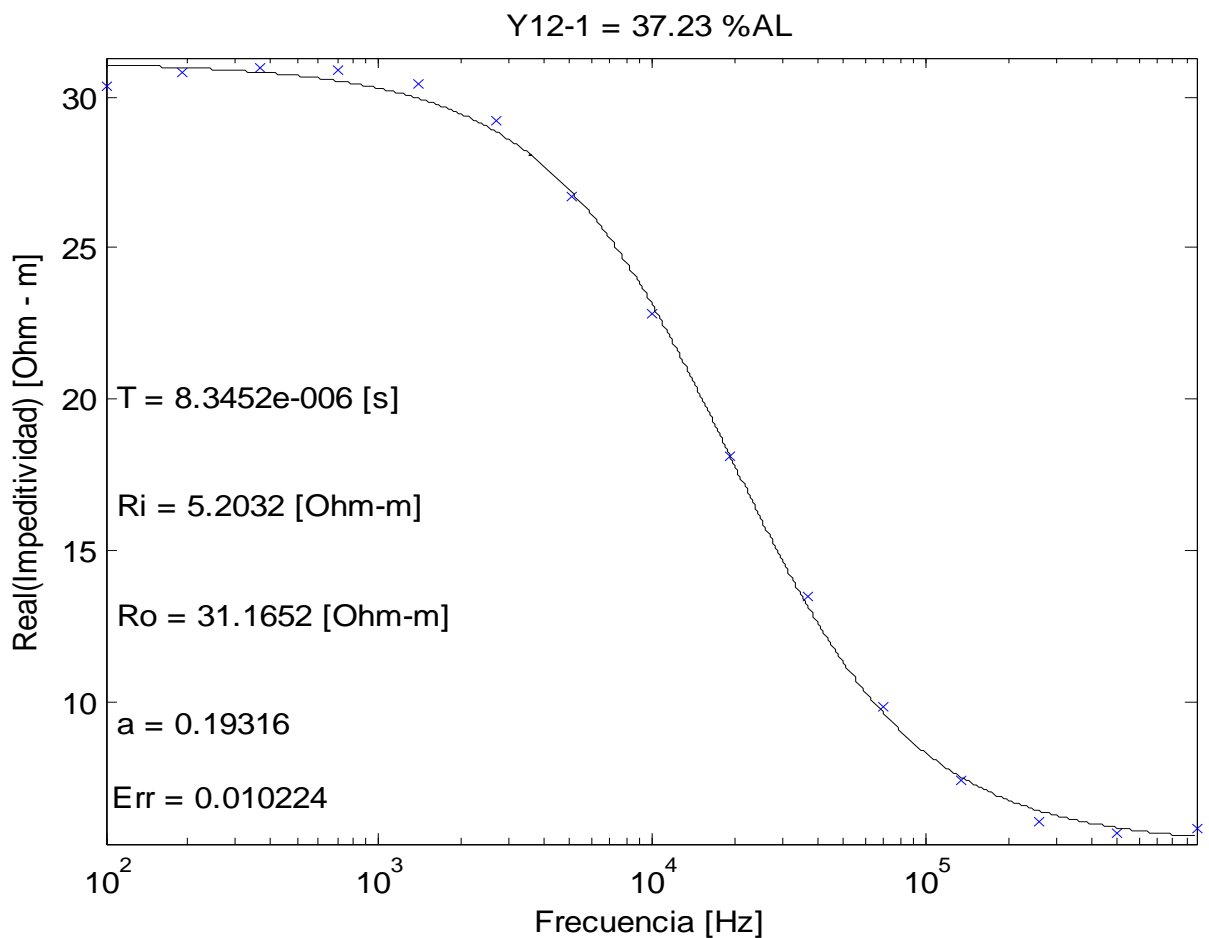
Y11-6 = 38.32 %AL

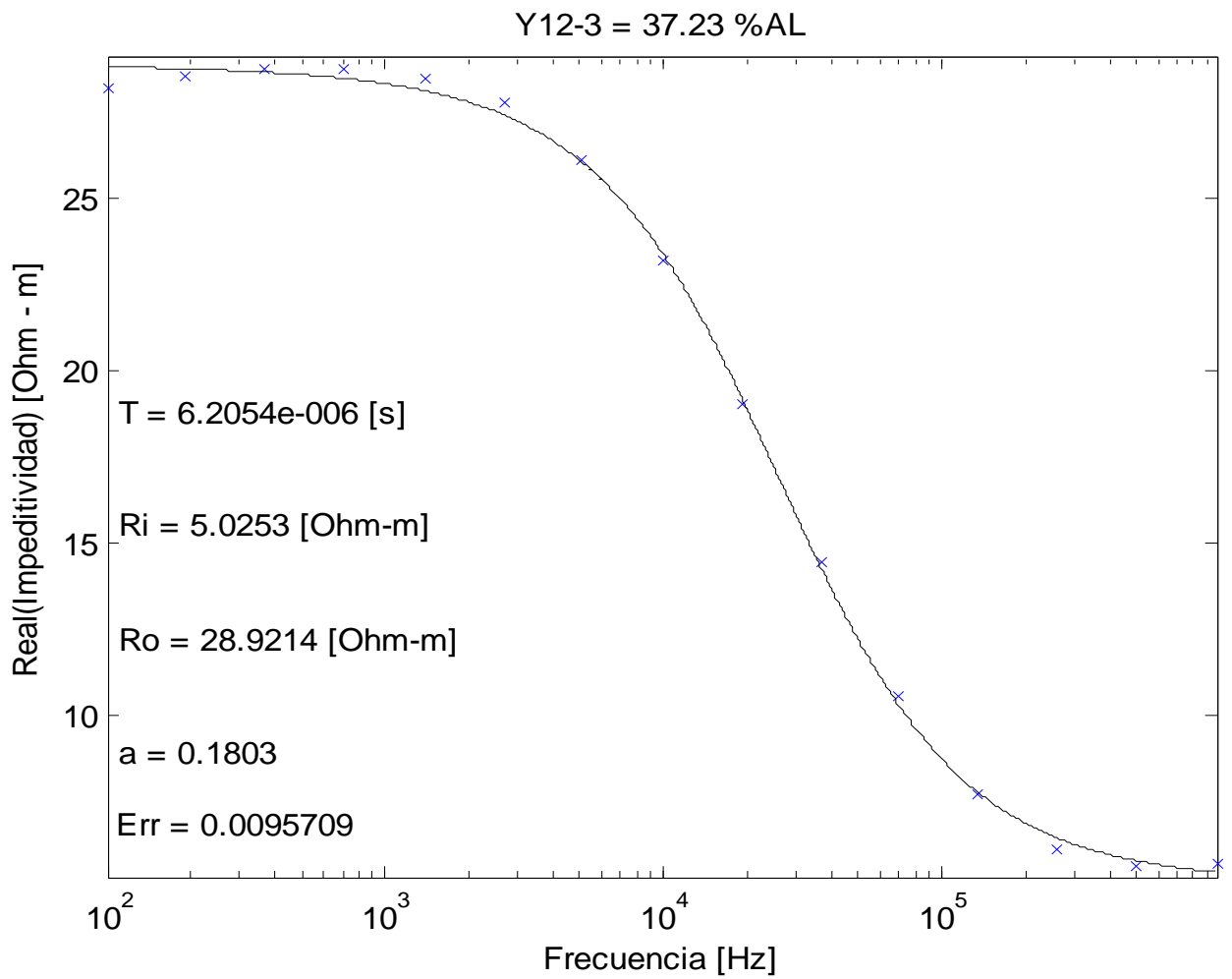
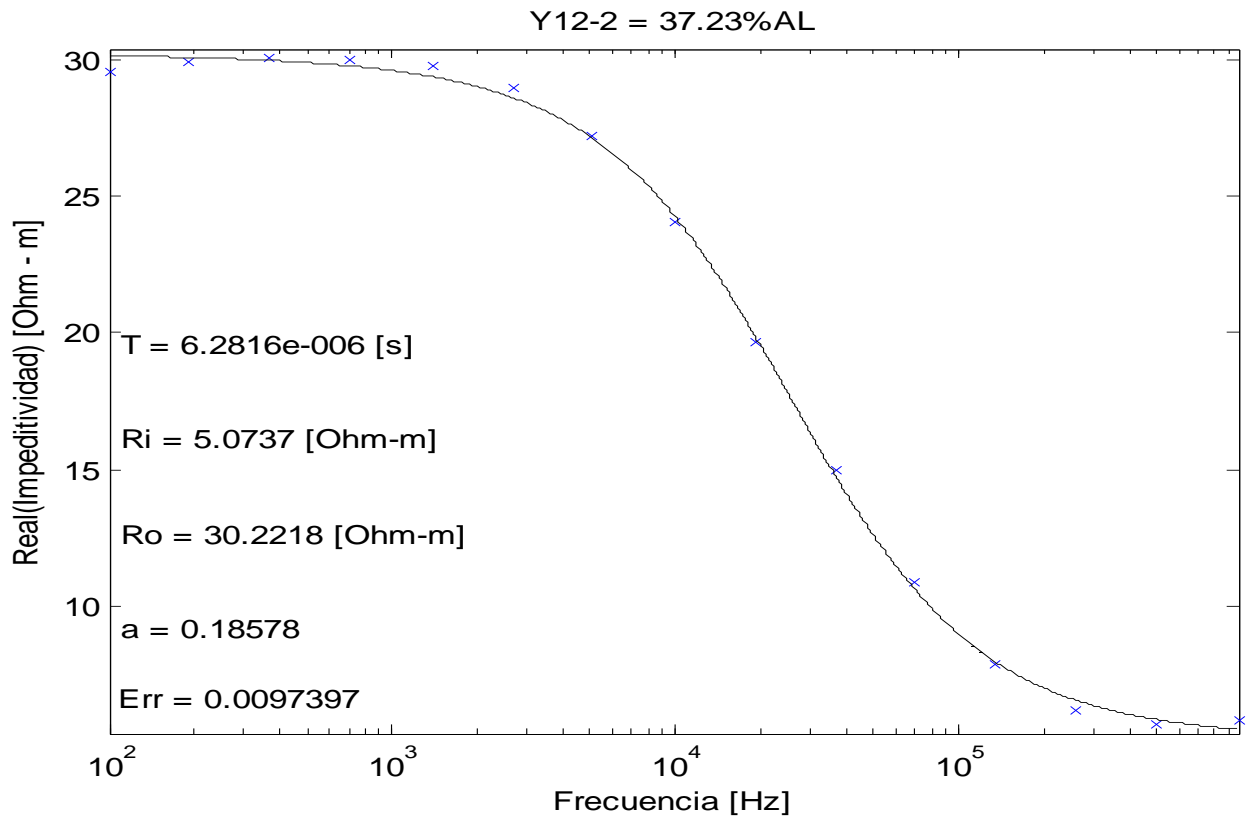


Y11-7 = 38.32 %AL

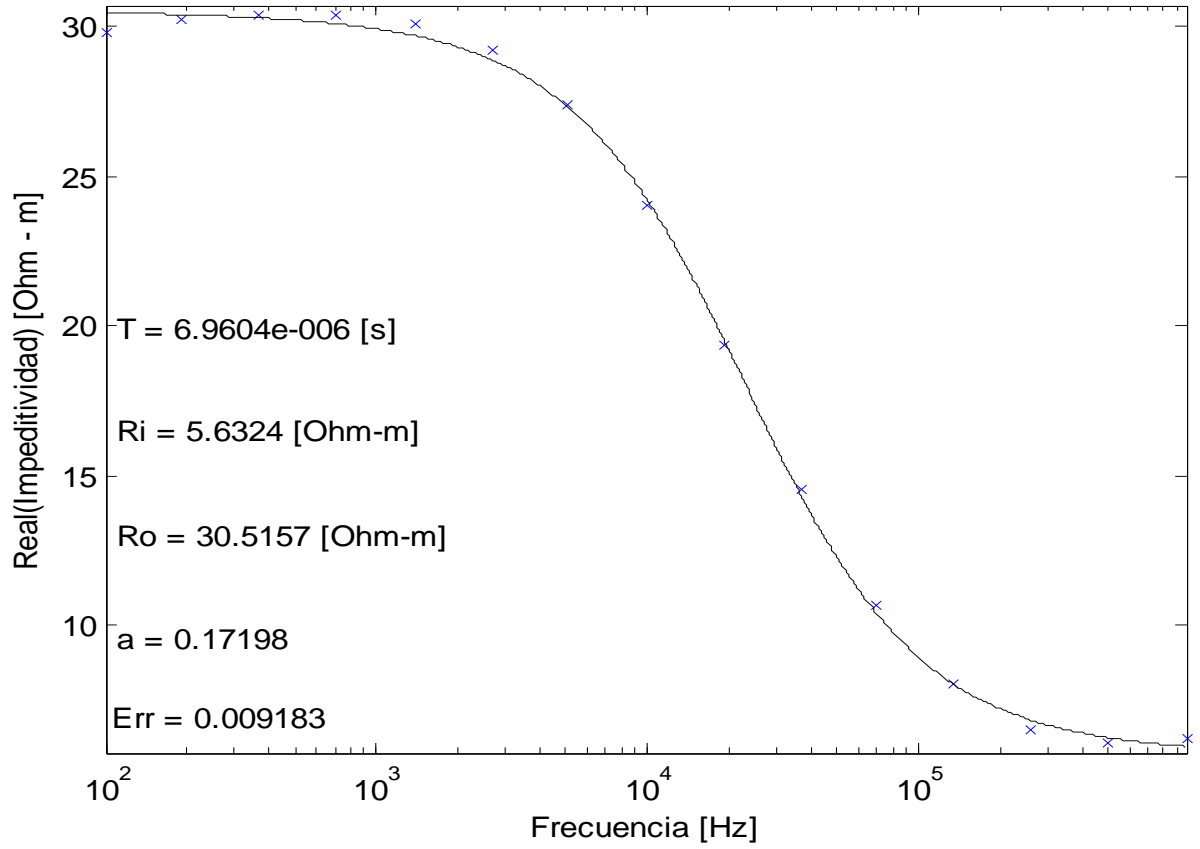


No Muestra (Peso Total de la muestra):	Muestra No 12 (3150 gr)						
GE [%](Para toda la muestra):	37.23%						
ARCHIVO IM6	y11327	y11328	y11329	y11333	y11332	y11334	y11335
Ro [Ohms-m]	31.165	30.2218	28.9214	30.516	29.1106	39.876	36.0488
PESO [gr]:	700	540	340	420	350	320	460
Serie de Identificación	Y12_1	Y12_2	Y12_3	Y12_4	Y12_5	Y12_6	Y12_7
%AL por Espectrofotometría	ESPF:						

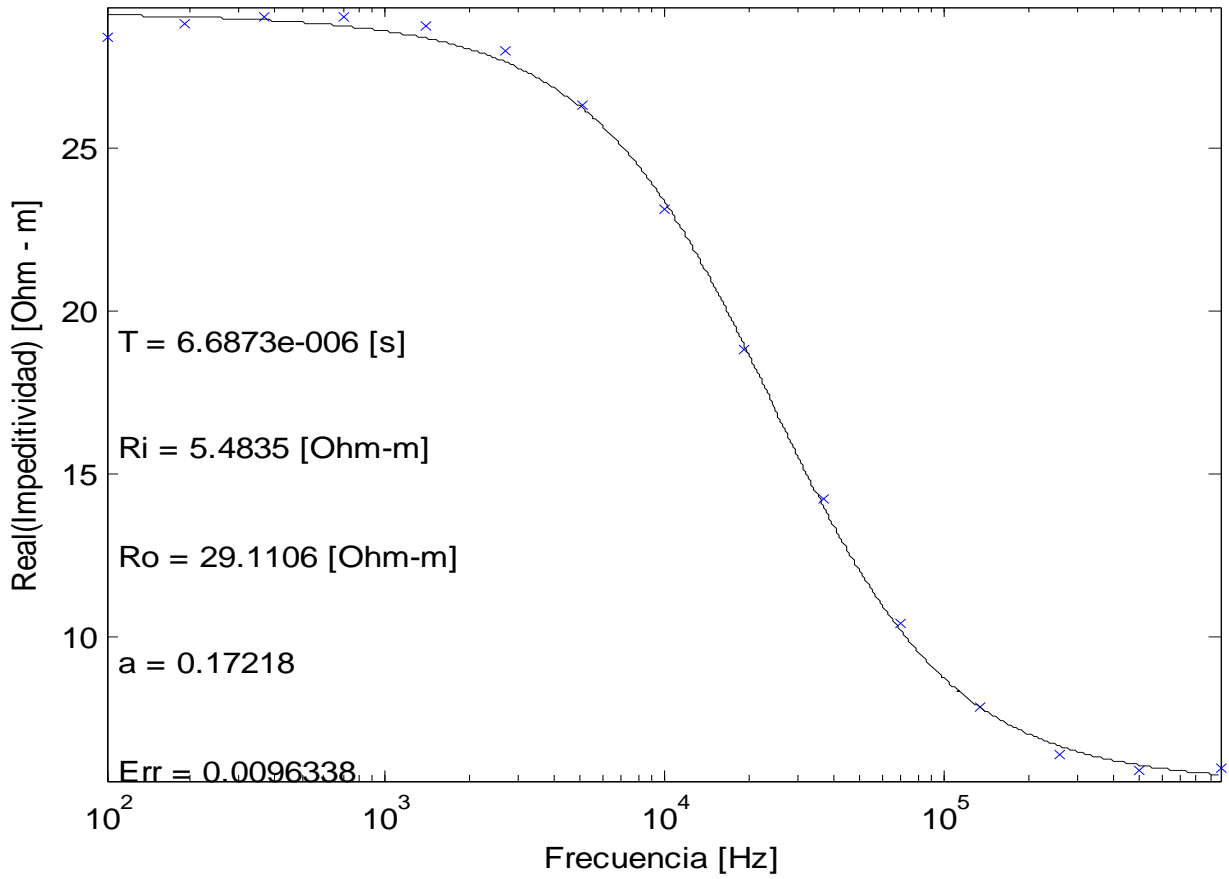




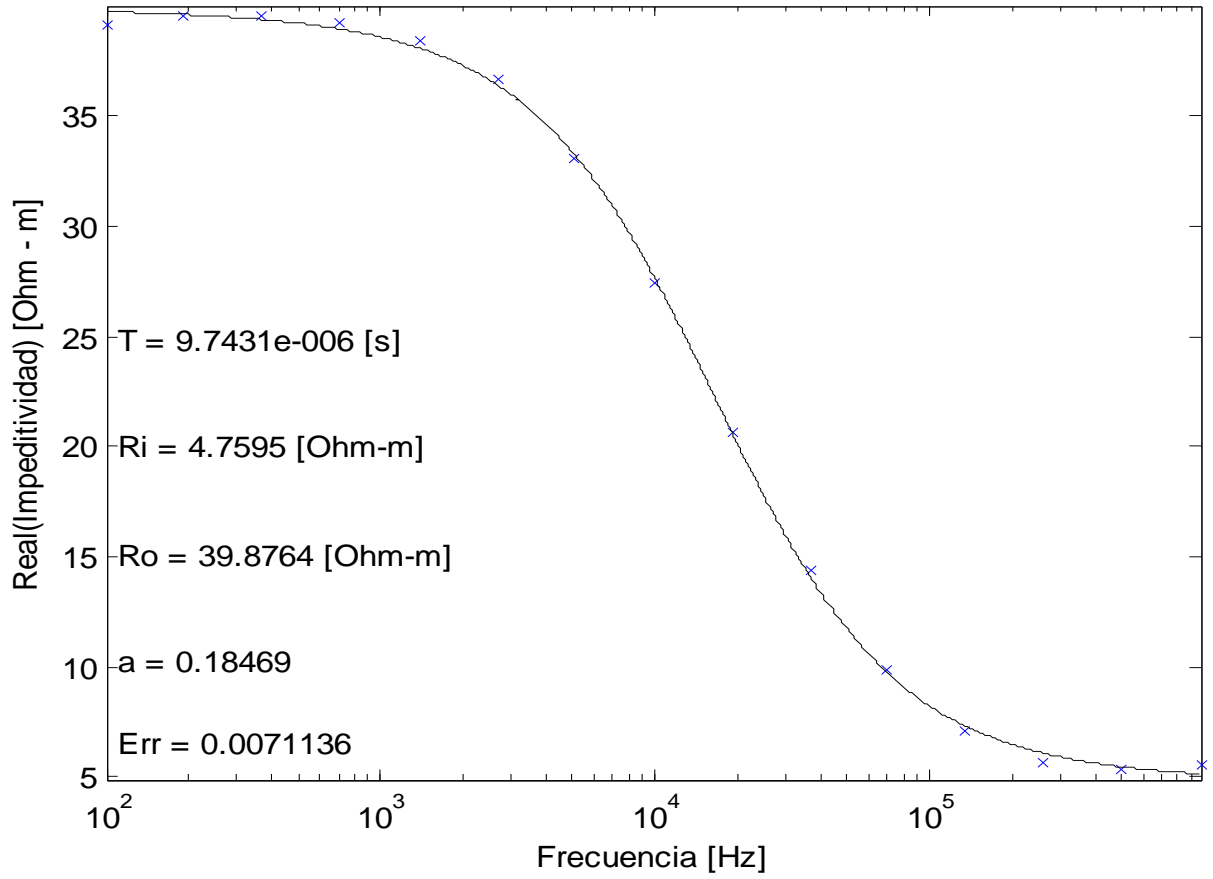
Y12-4 = 37.23%AL



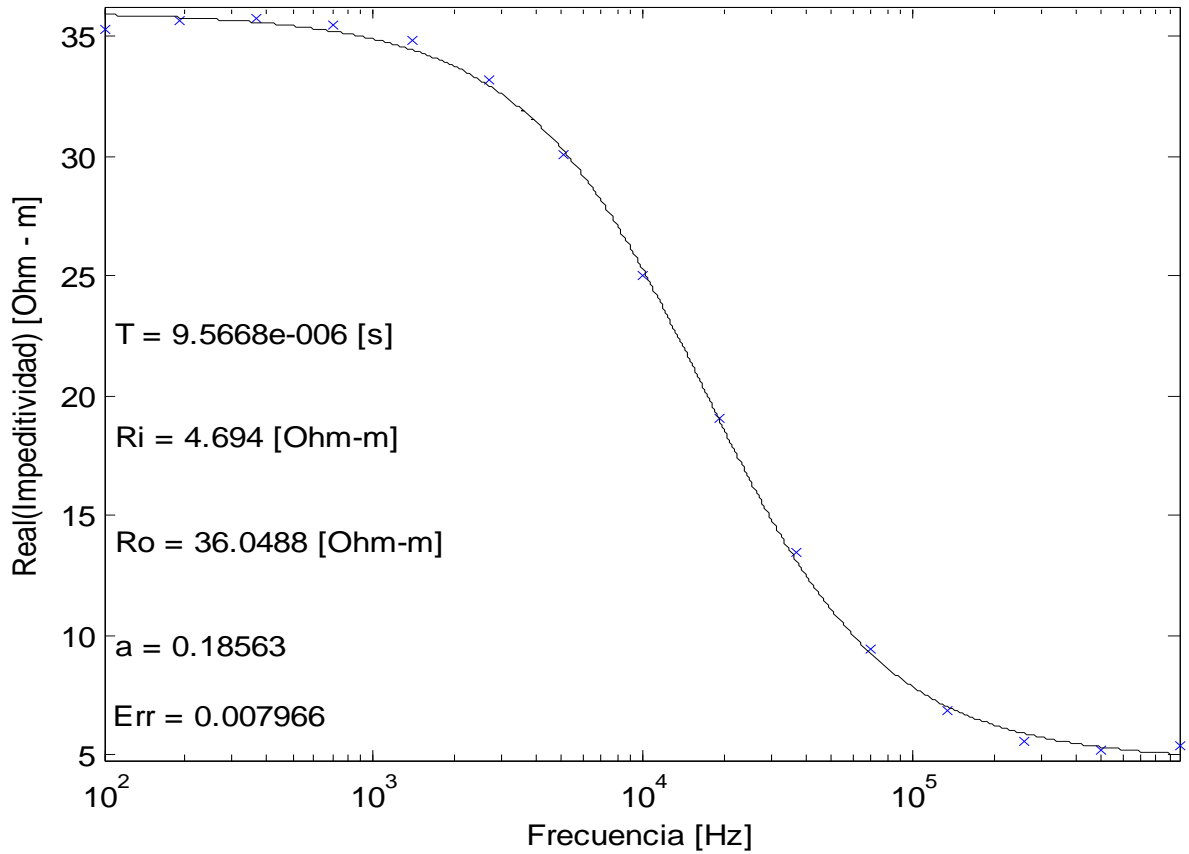
Y12-5 = 37.23 %AL



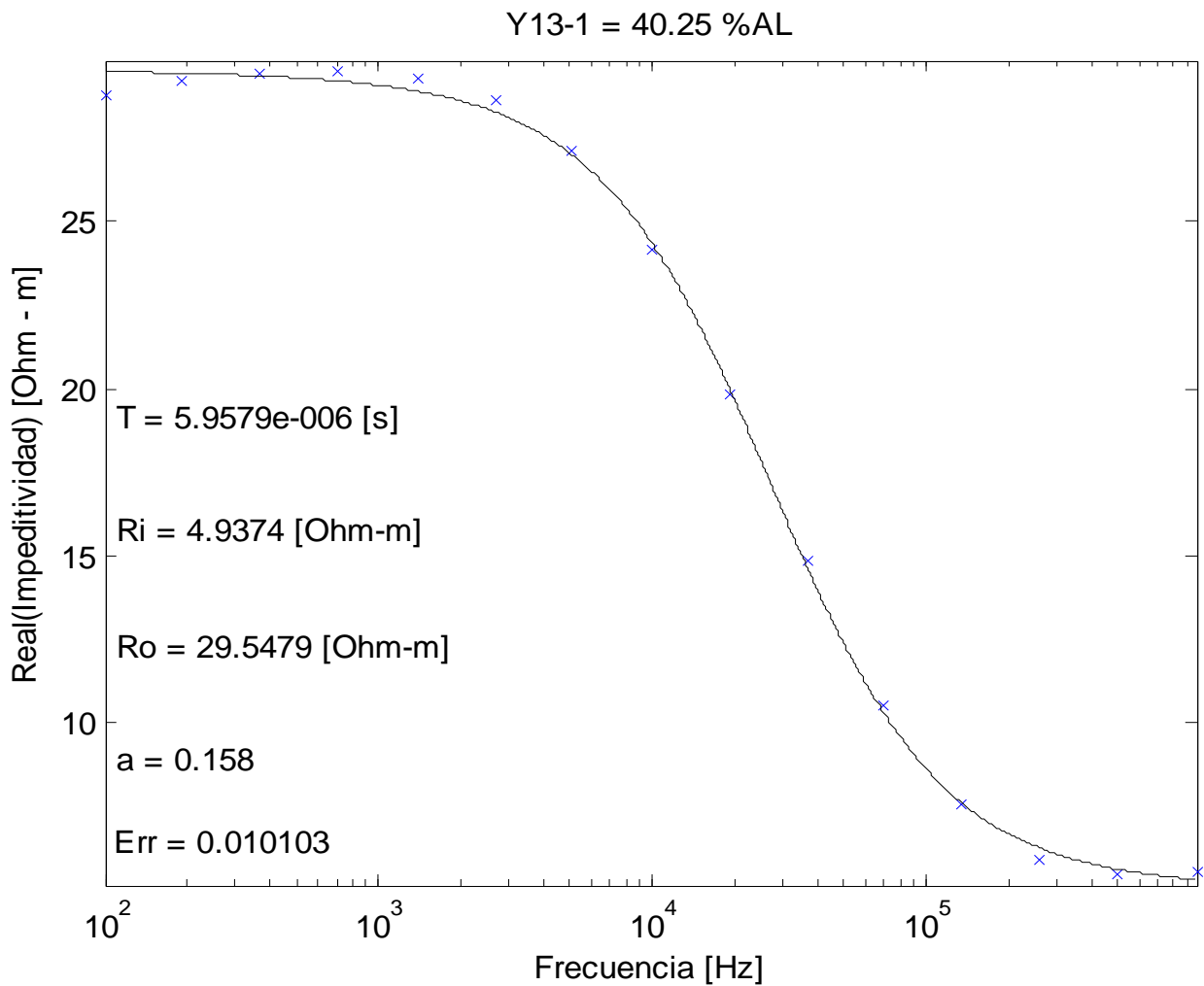
Y12-6 = 37.28 %AL



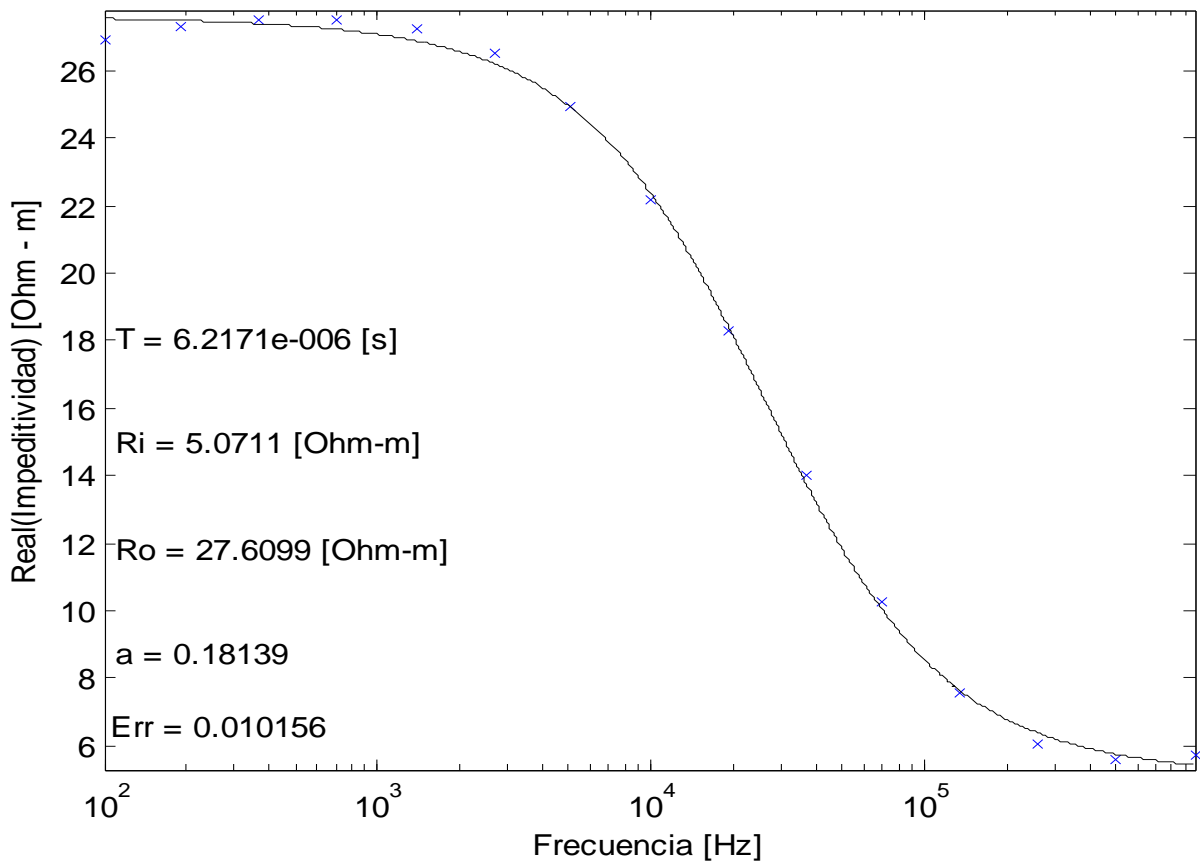
Y12-7 = 37.28 %AL



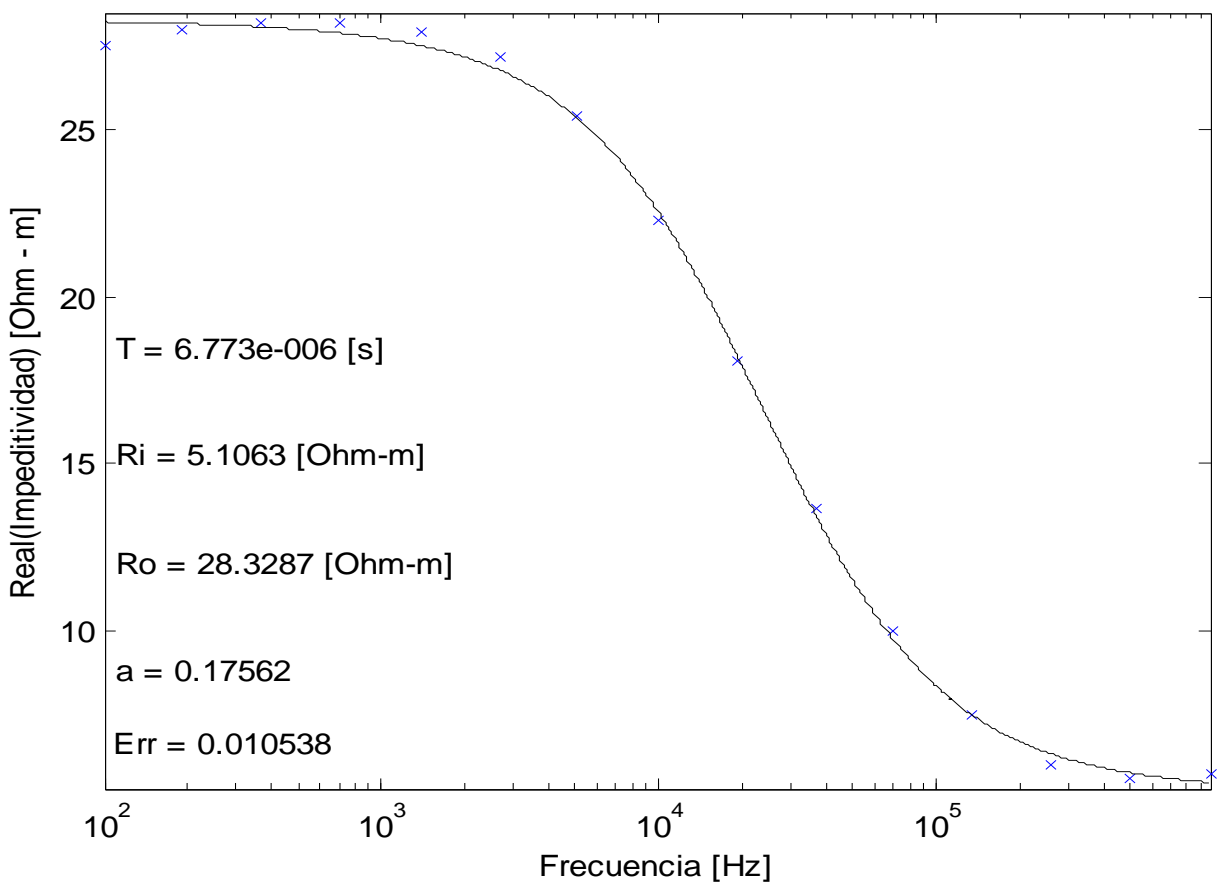
No Muestra (Peso Total de la muestra):	Muestra No 13 (3300)								
GE [%](Para toda la muestra):	40.25%								
ARCHIVO IM6	y11338	y11340	y11341	y11344	y11345	y11347	y11350	y11351	y11352
Ro [Ohm-m]	29.5479	27.6099	28.3287	31.374	31.3736	26.089	28.9657	31.8793	29.339
PESO [gr]:	310	360	400	560	270	190	210	410	570
Serle de Identificación	Y13_1	Y13_2	Y13_3	Y13_4	Y13_5	Y13_6	Y13_7	Y13_8	Y13_9
%AL por Espectrofotometría									

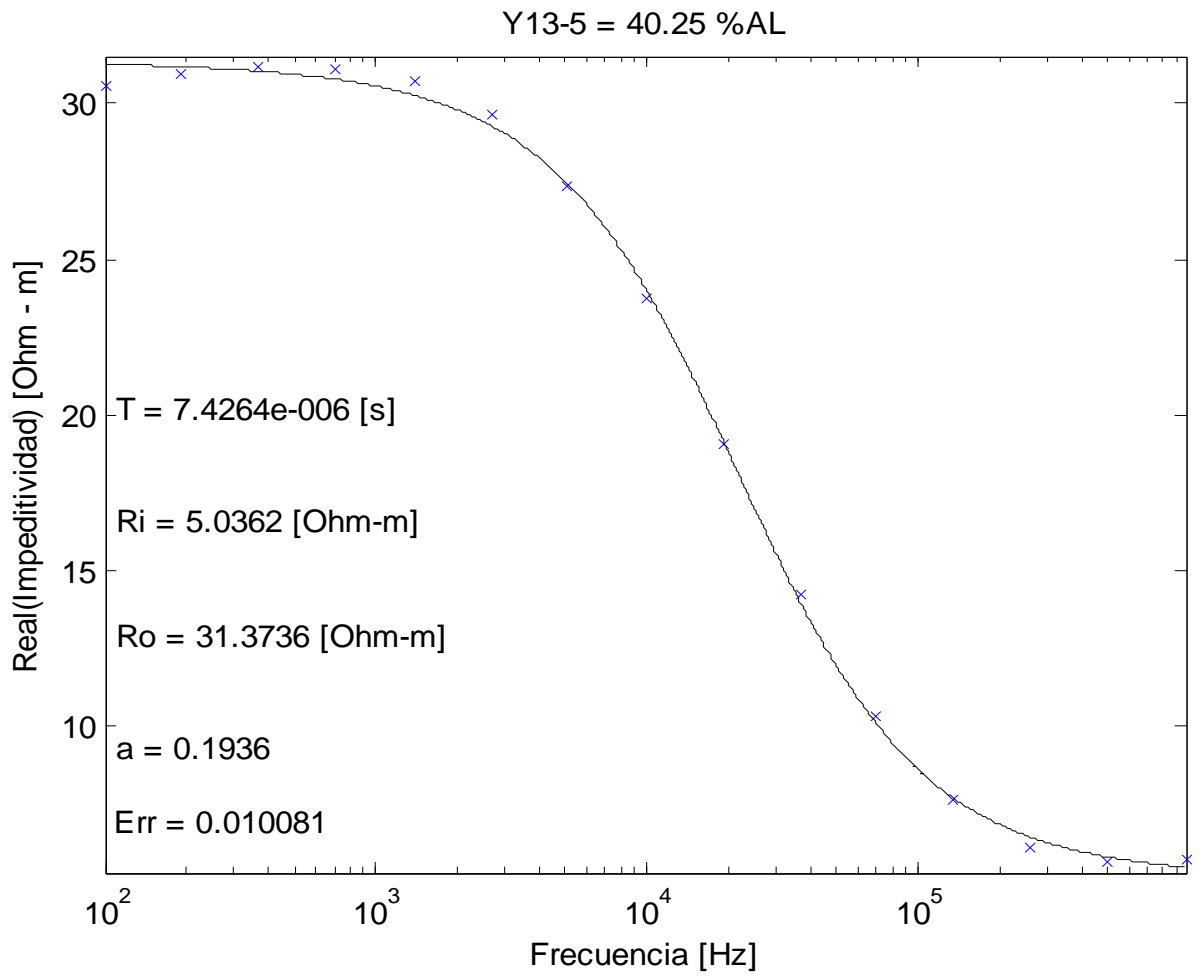
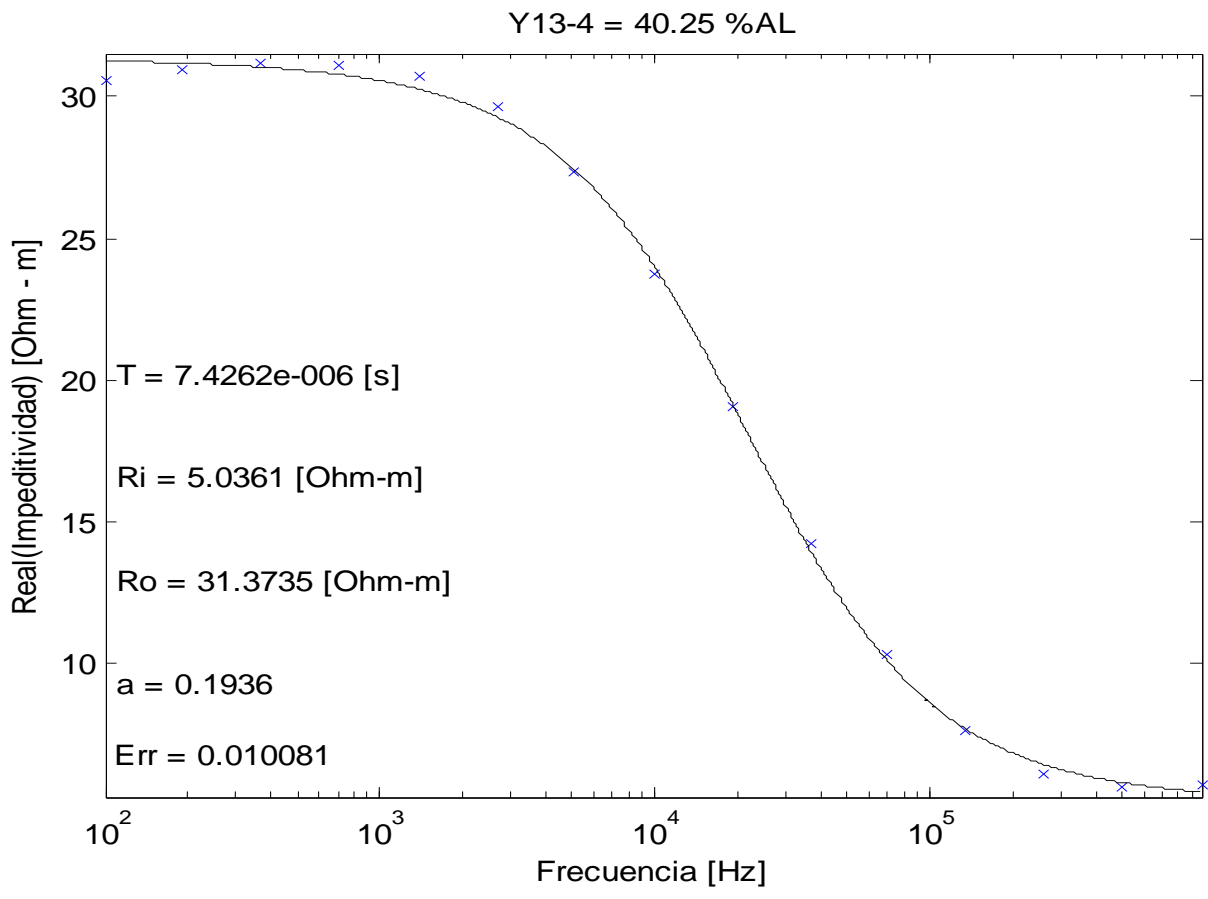


Y13-2 = 40.25 %AL

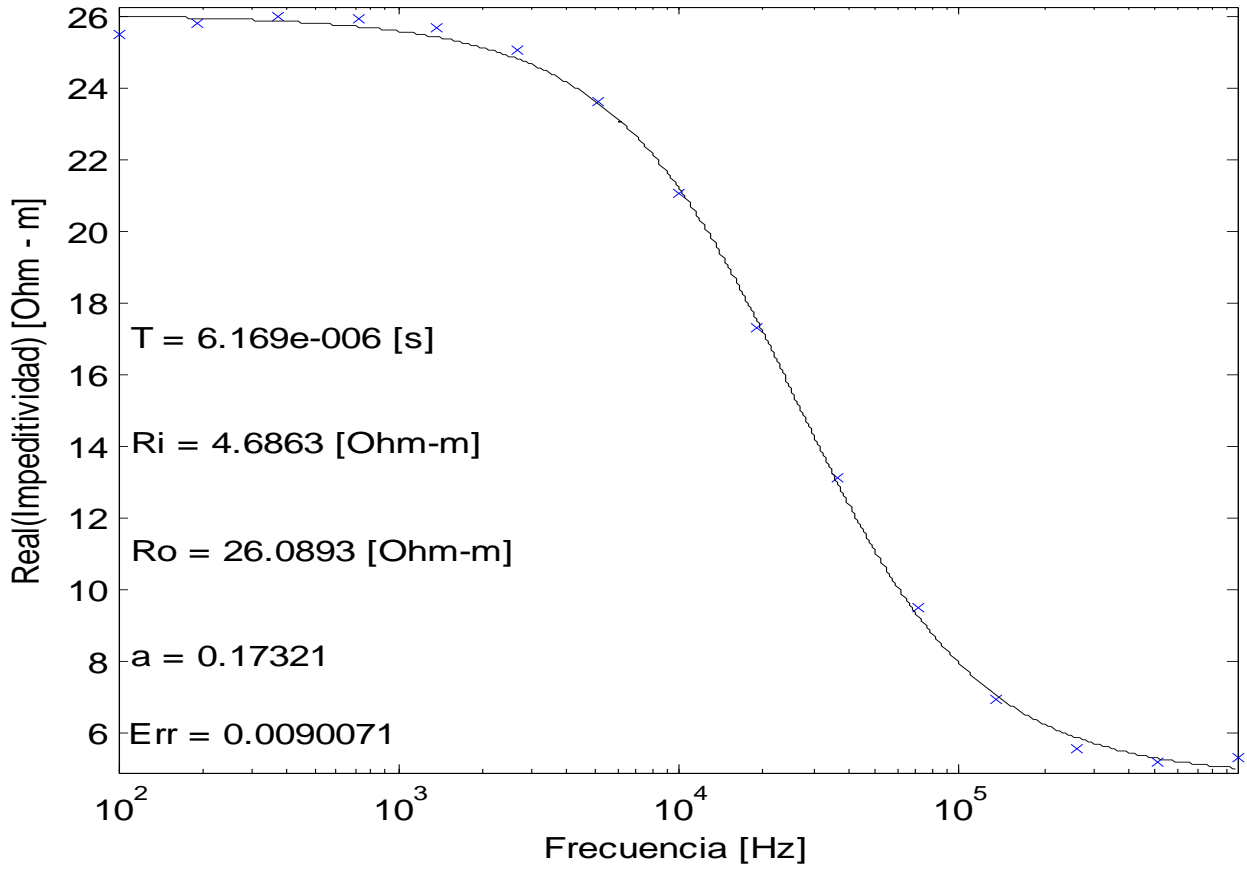


Y13-3 = 40.25 %AL

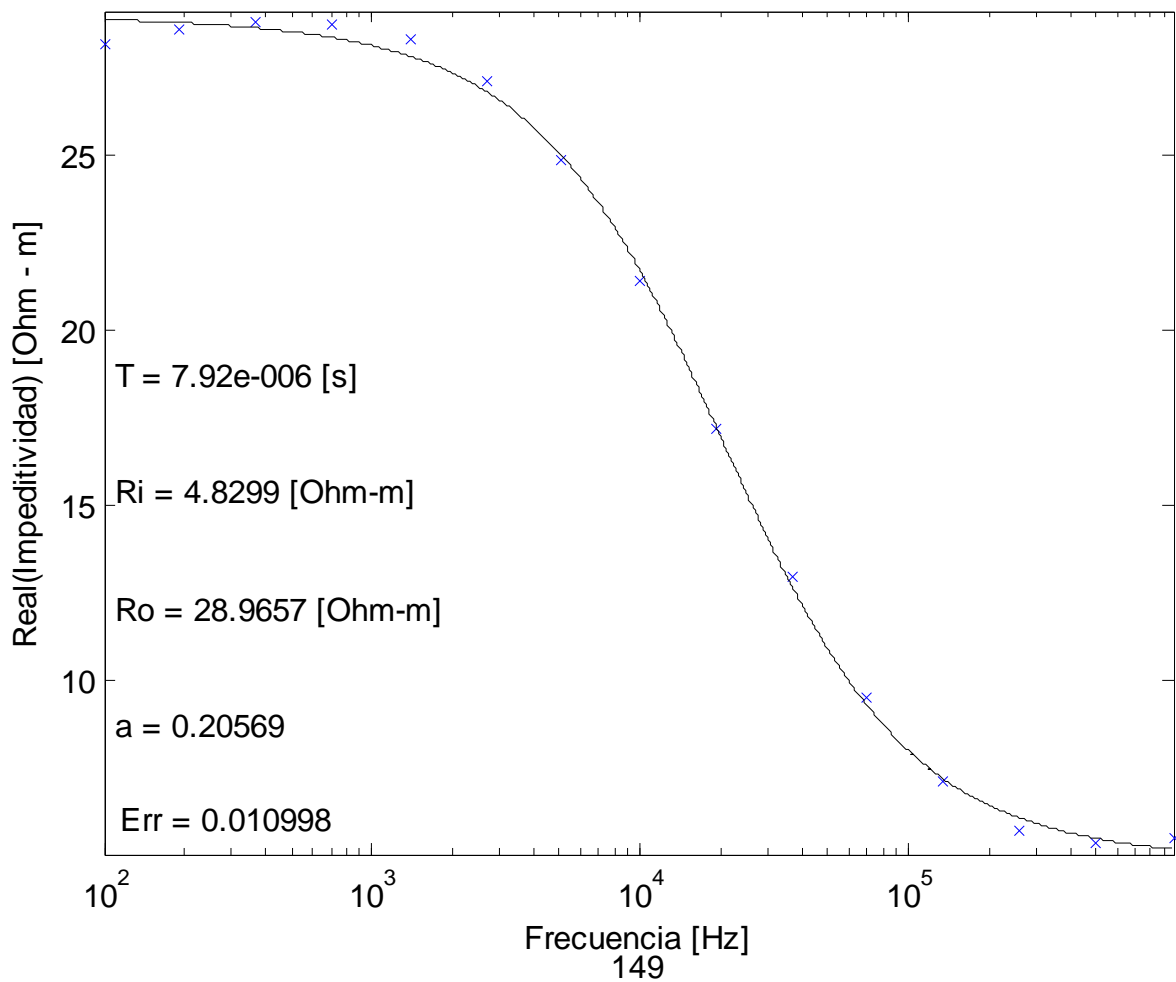




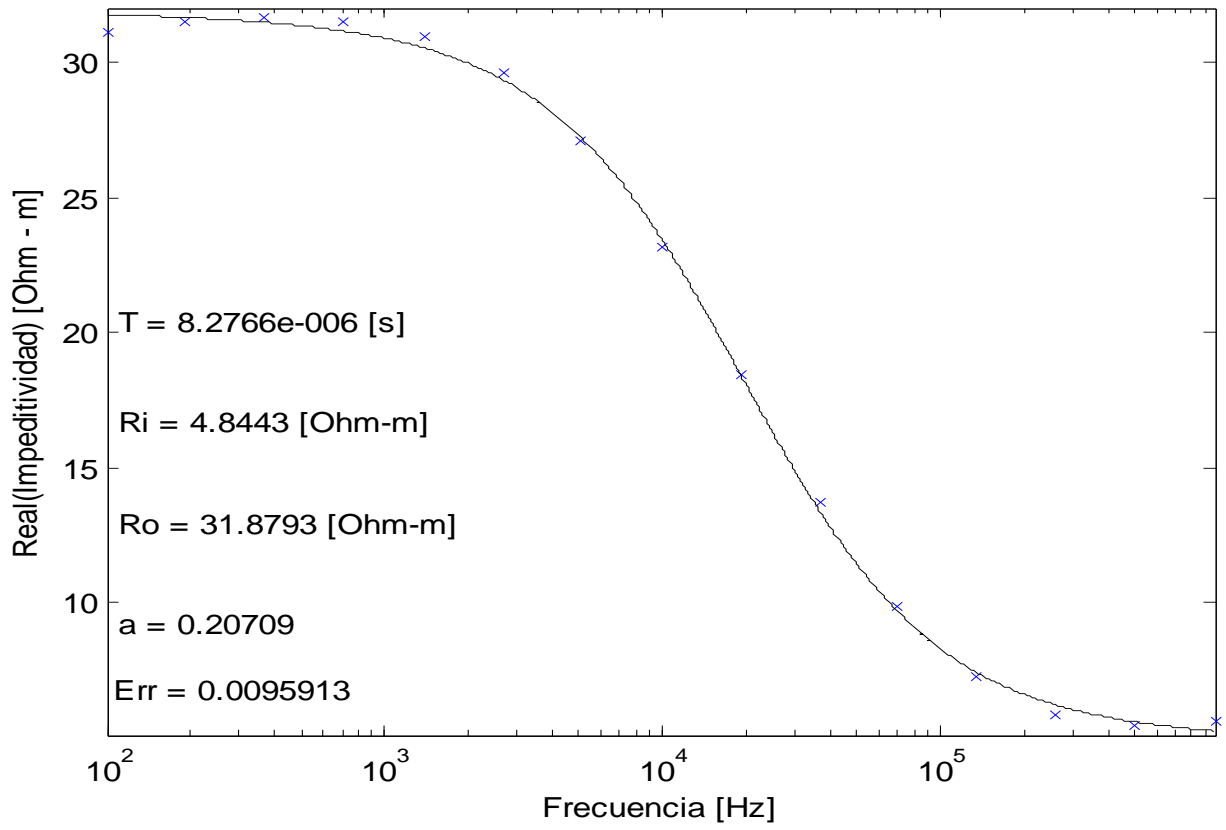
Y13-6 = 40.25 %AL



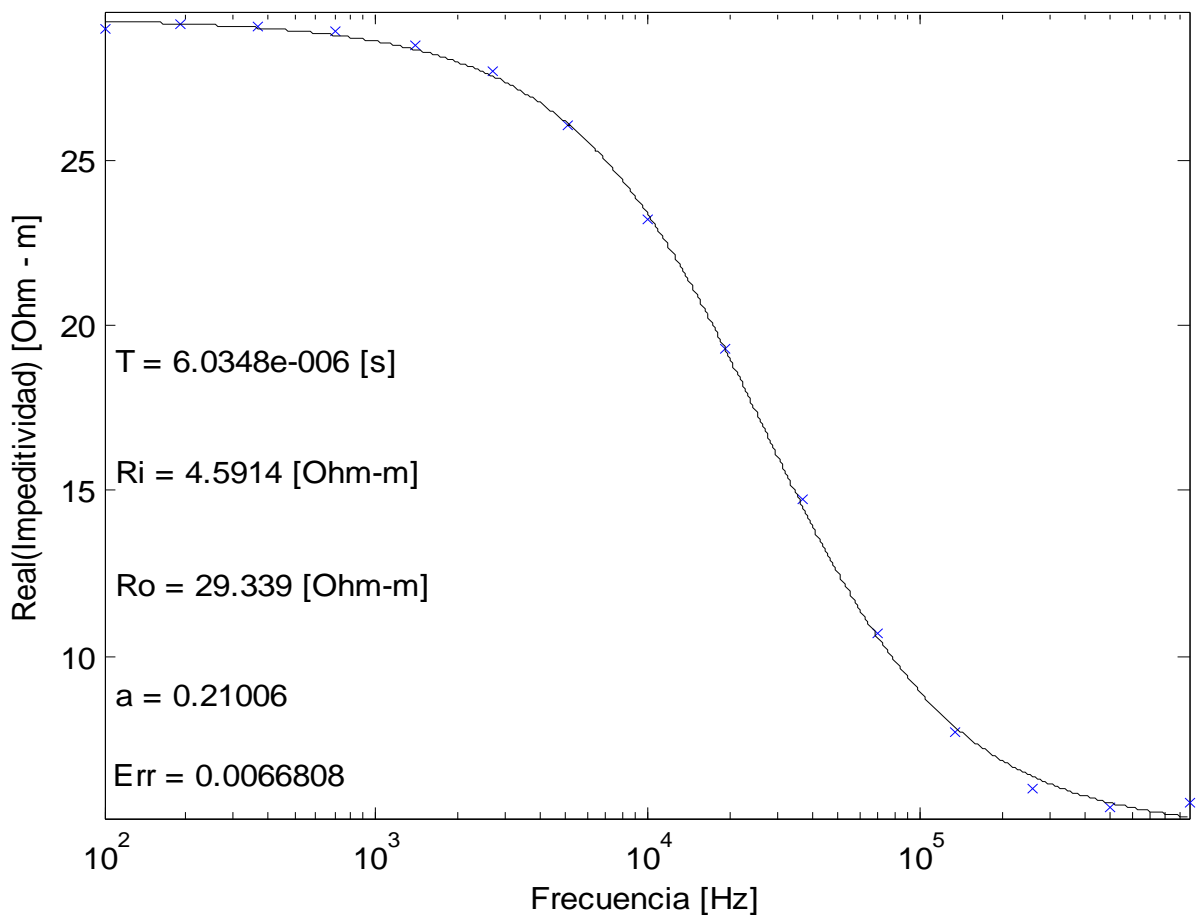
Y13-7 = 40.25 %AL



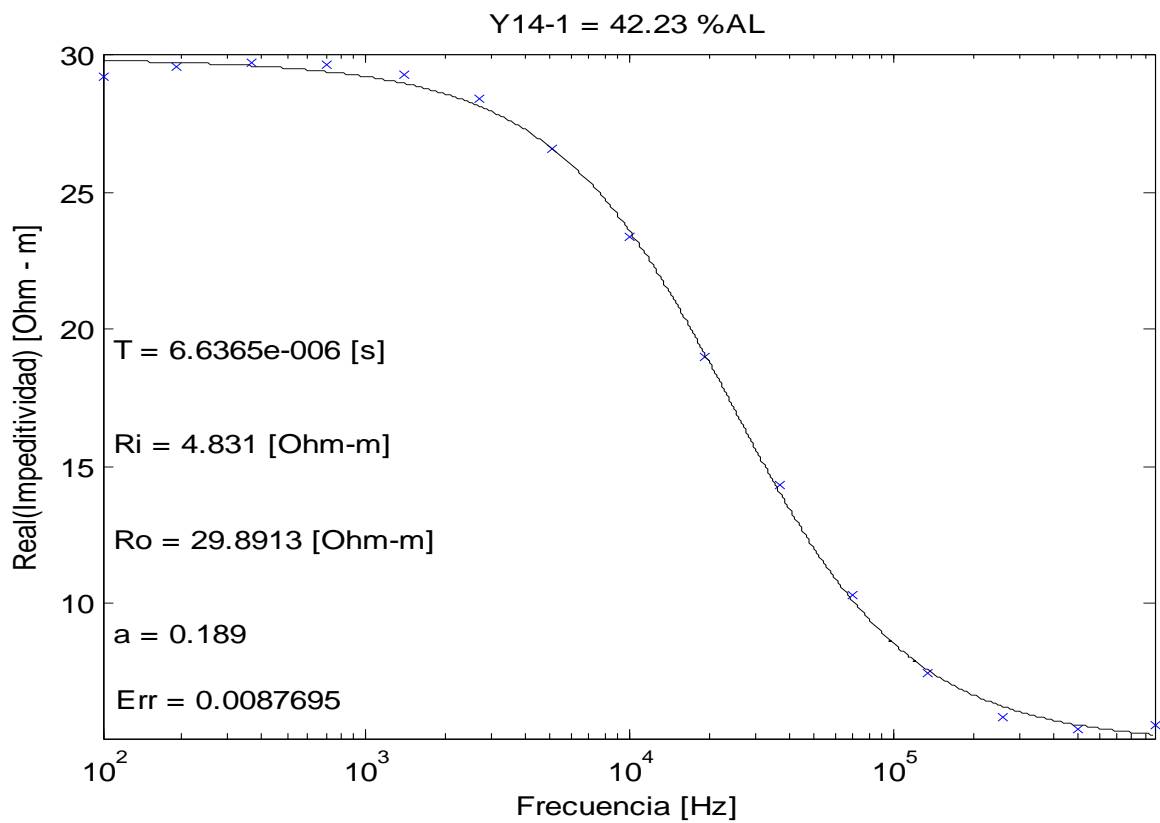
Y13-8 = 40.25 %AL



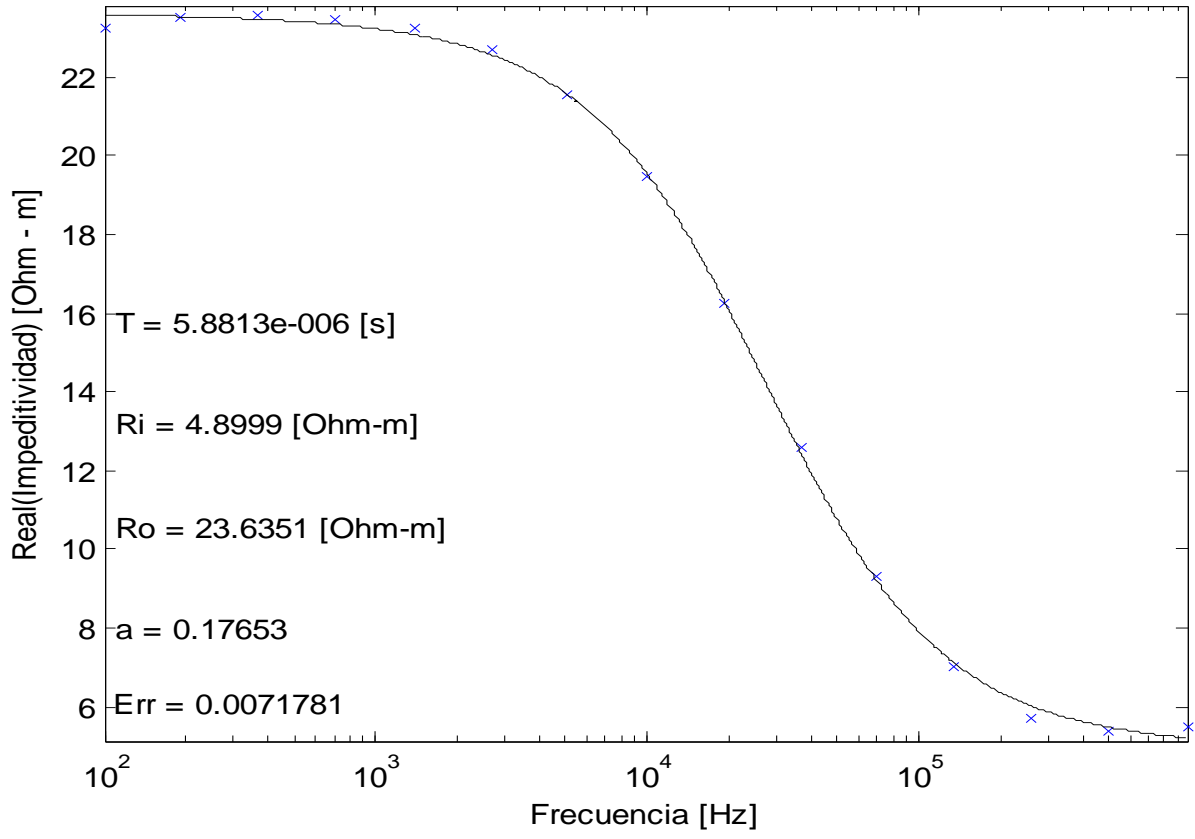
Y13-9 = 40.25 %AL



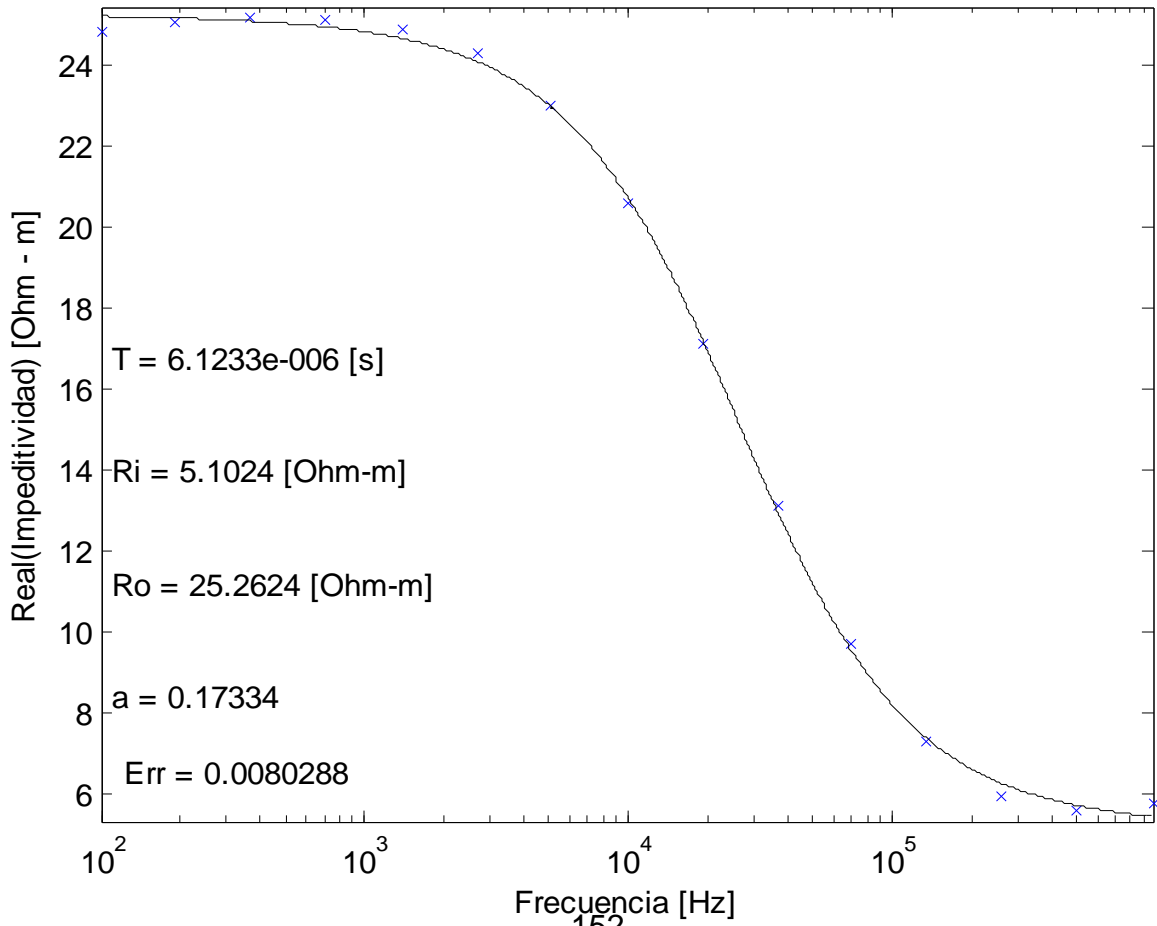
No Muestra (Peso Total de la muestra):	Muestra No 14 (2980)					
GE [%](Para toda la muestra):	42.23%					
ARCHIVO IM6	y11353	y11356	y11357	y11358	y11359	y11363
Ro [Ohm-m]	29.8913	23.635	25.2624	31.982	24.2513	28.576
PESO [gr]:	600	710	320	510	450	380
Serie de Identificación	Y14_1	Y14_2	Y14_3	Y14_4	Y14_5	Y14_6
%AL por Espectrofotometría	ESPF:					



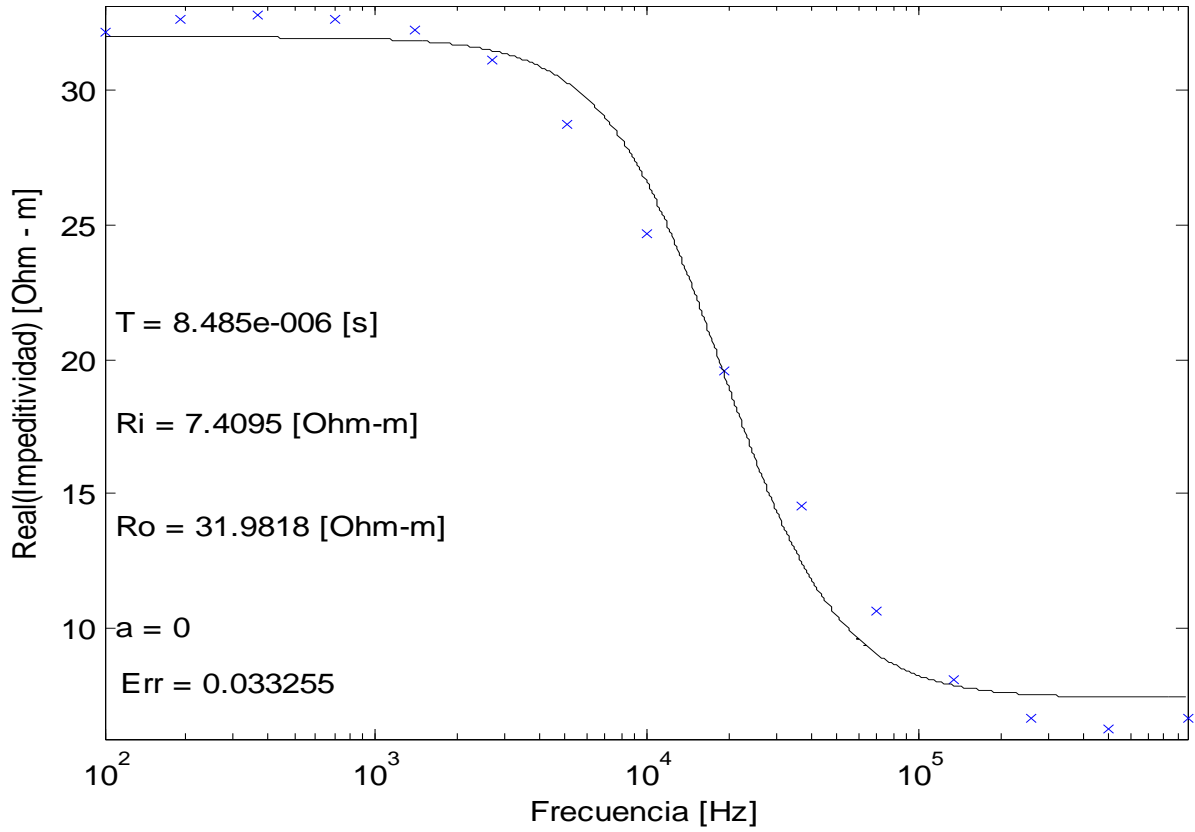
Y14-2 = 42.23 %AL



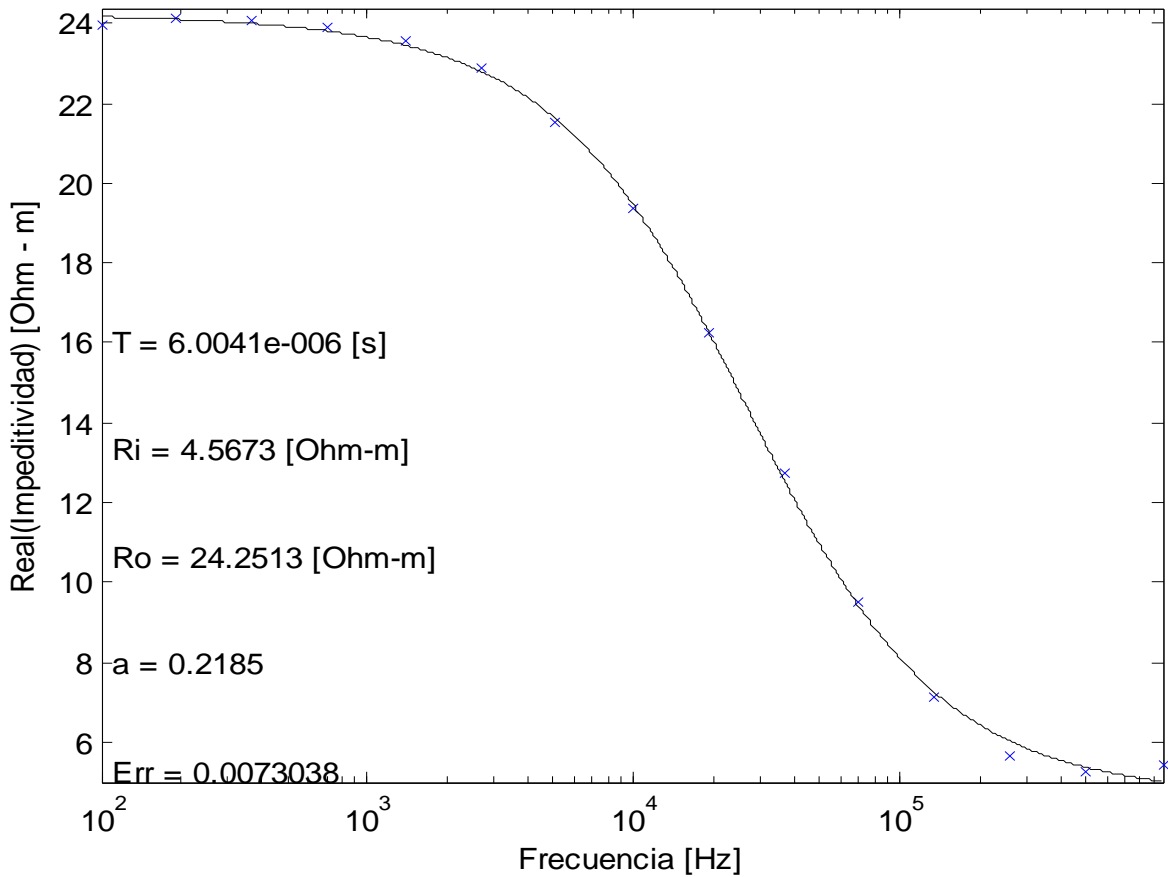
Y14-3 = 42.23 %AL

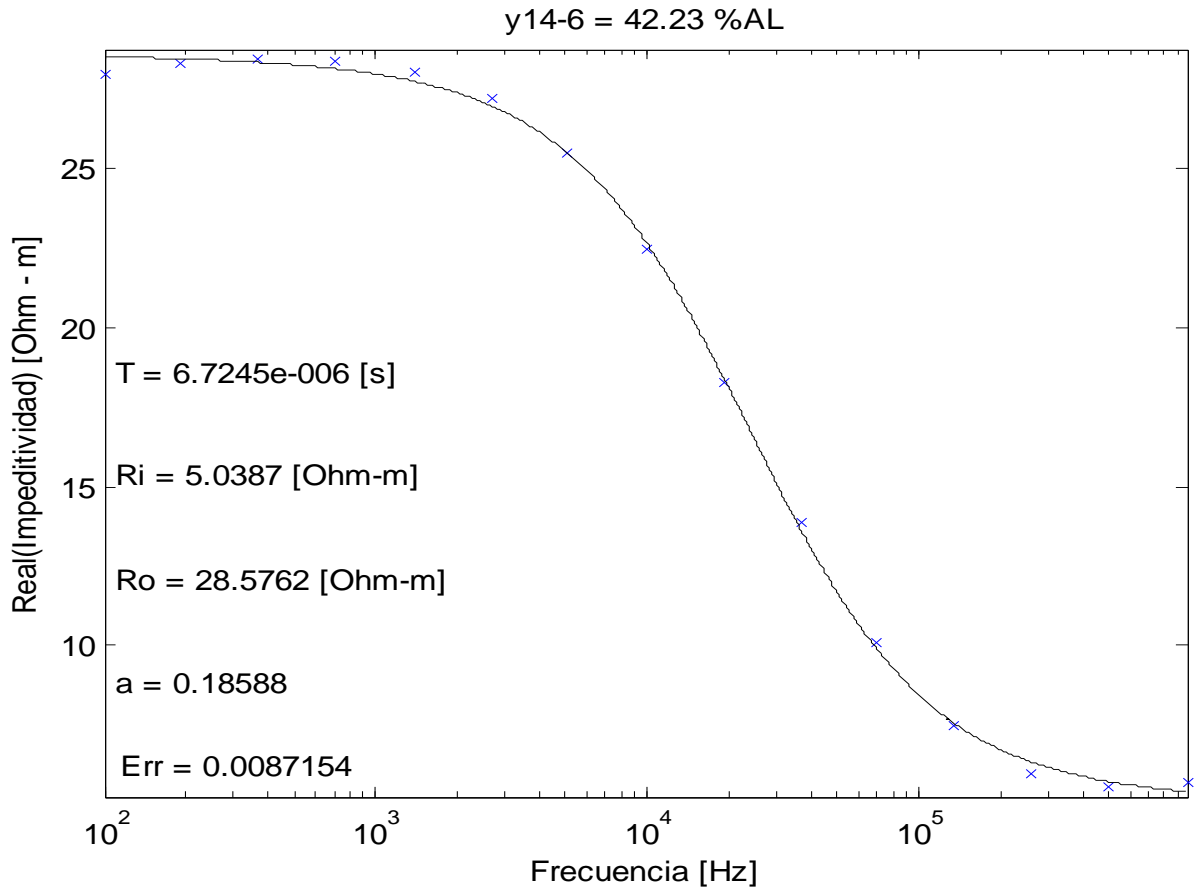


Y14-4 = 42.23 %AL



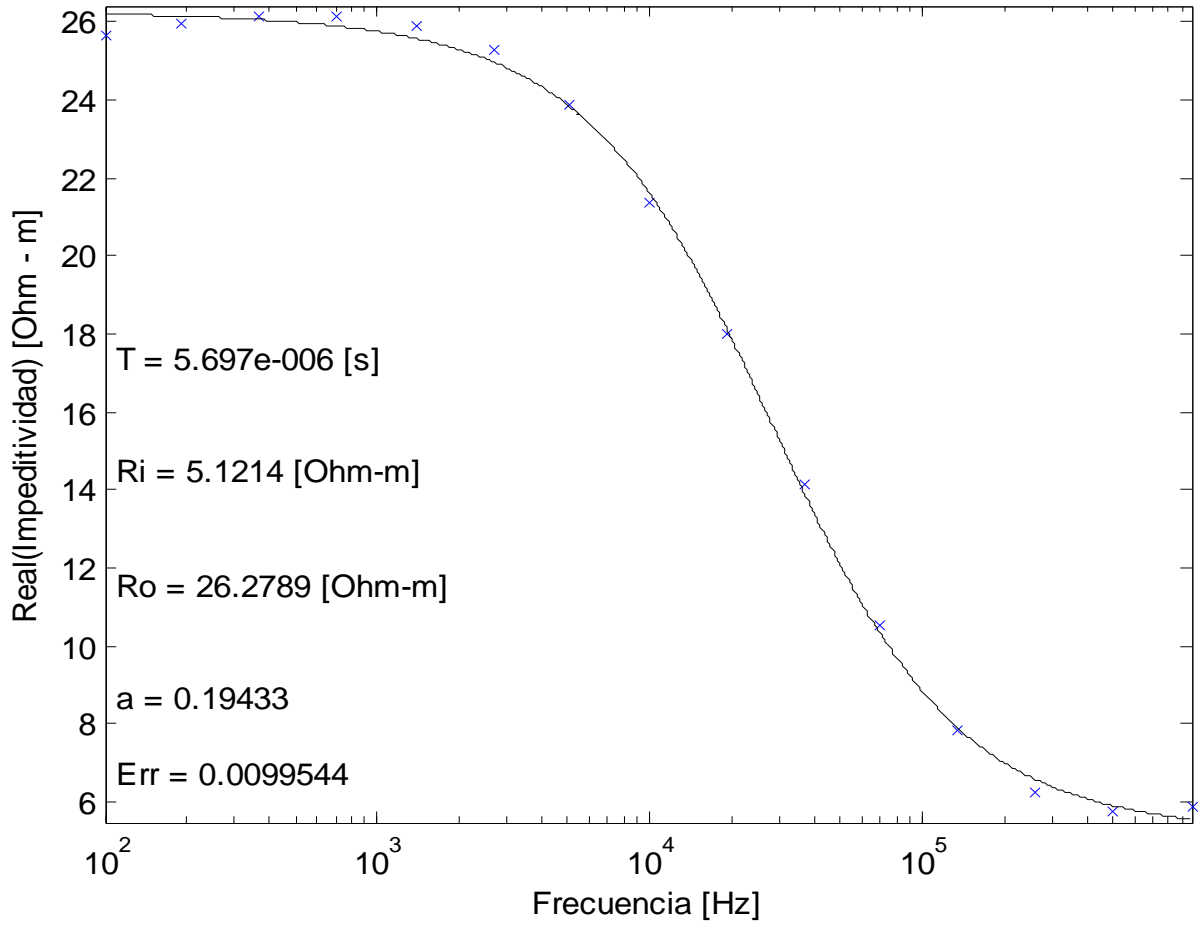
Y14-5 = 42.23 %AL



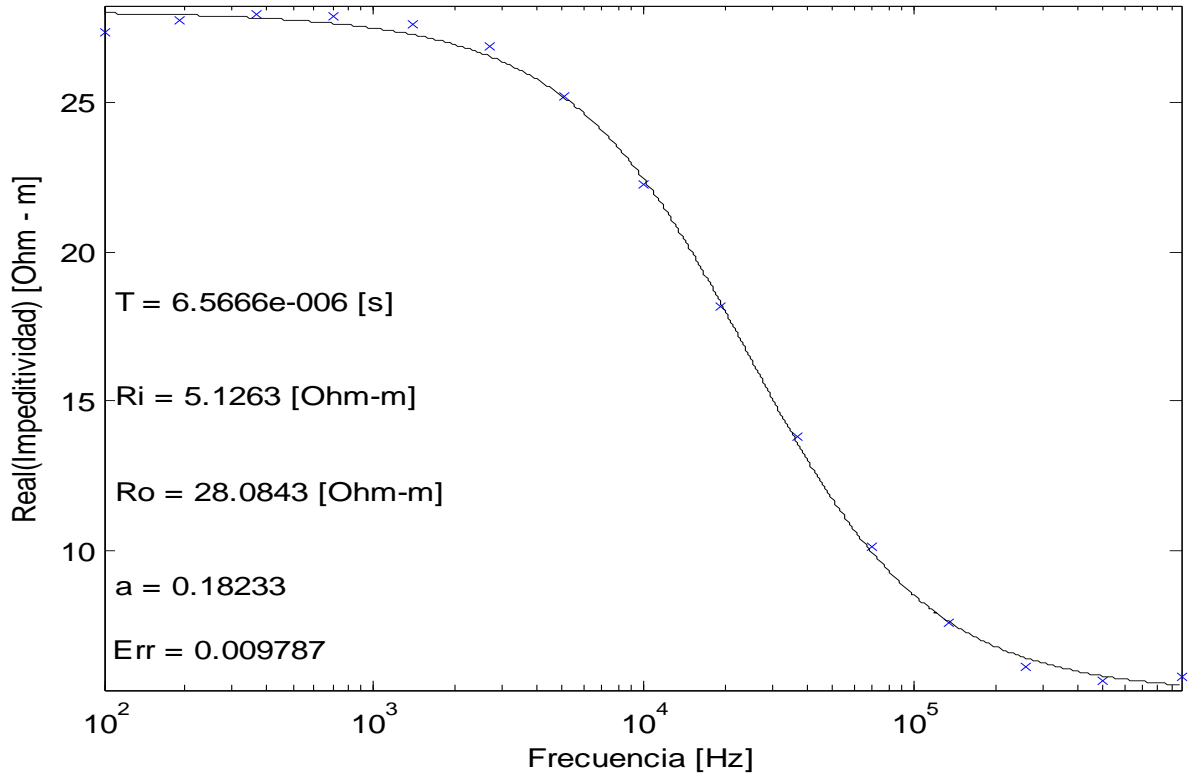


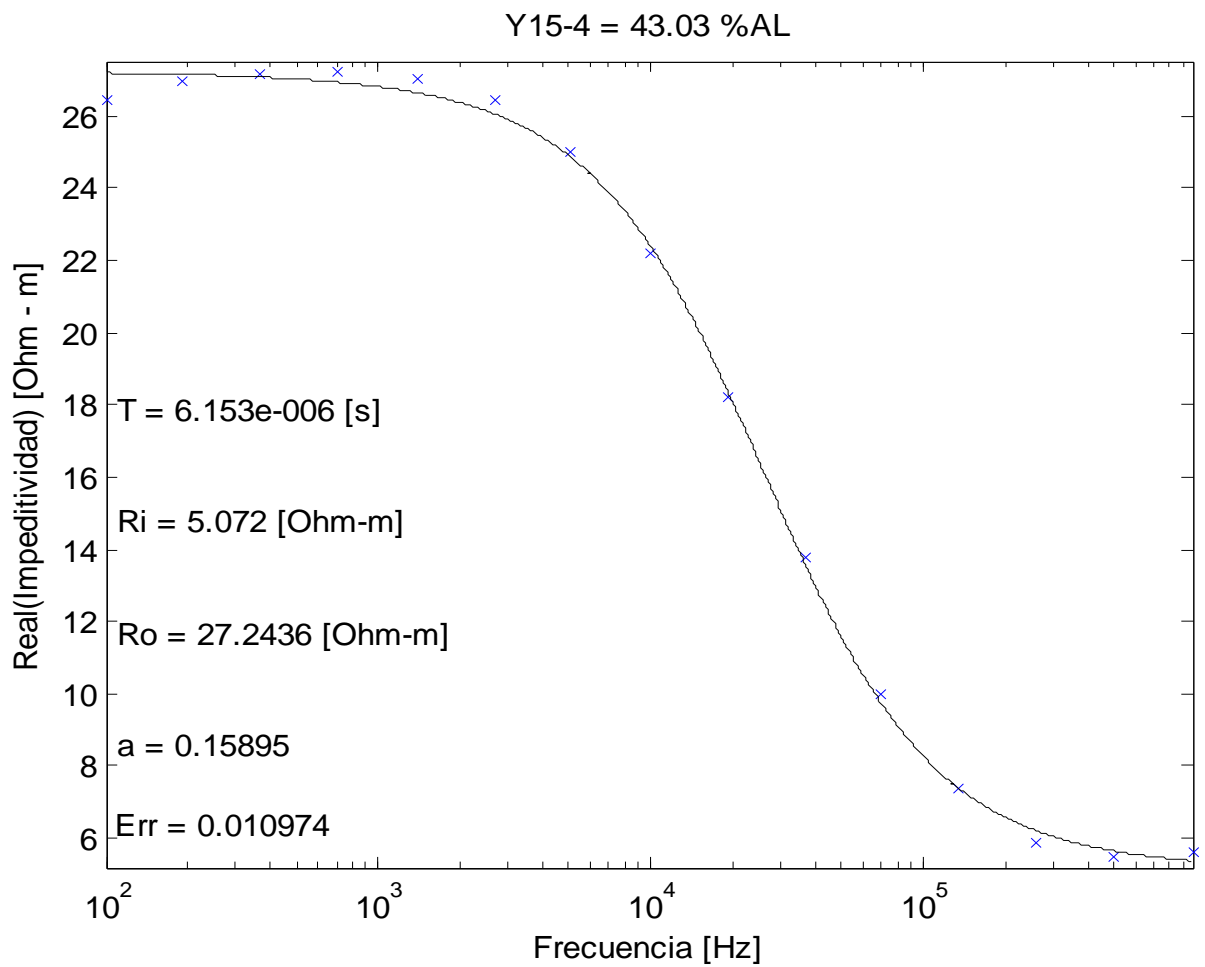
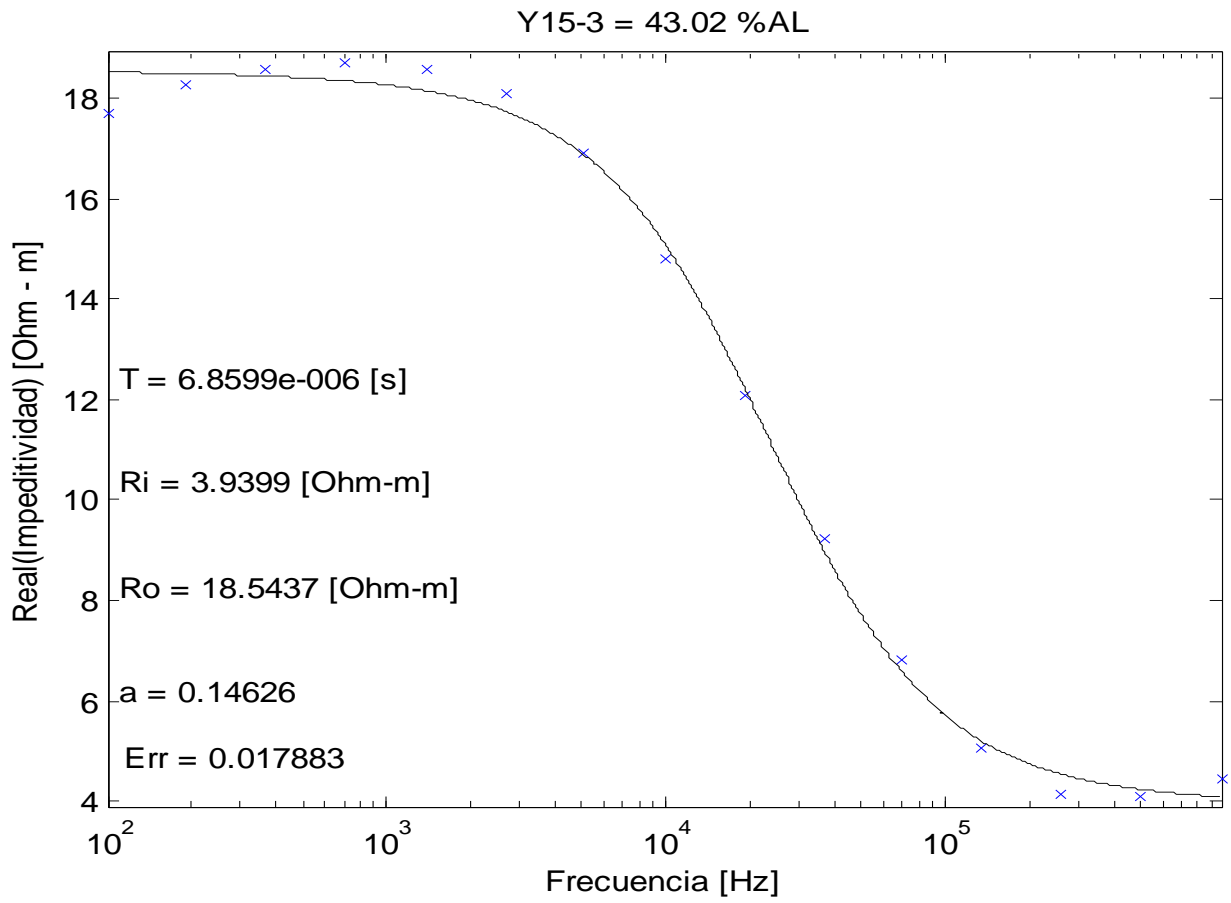
No Muestra (Peso Total de la muestra):	Muestra No 15 (2960)					
GE [%](Para toda la muestra):	43.02%					
ARCHIVO IM6	y11364	y11365	y11366	y11368	y11369	y11370
Ro [Ohms-m]	26.2789	28.0843	18.5437	27.244	28.4817	23.542
PESO [gr]:	460	540	560	600	400	380
Serie de Identificación	Y15_1	Y15_2	Y15_3	Y15_4	Y15_5	Y15_6
%AL por Espectrofotometría						

Y15-1 = 43.02 %AL

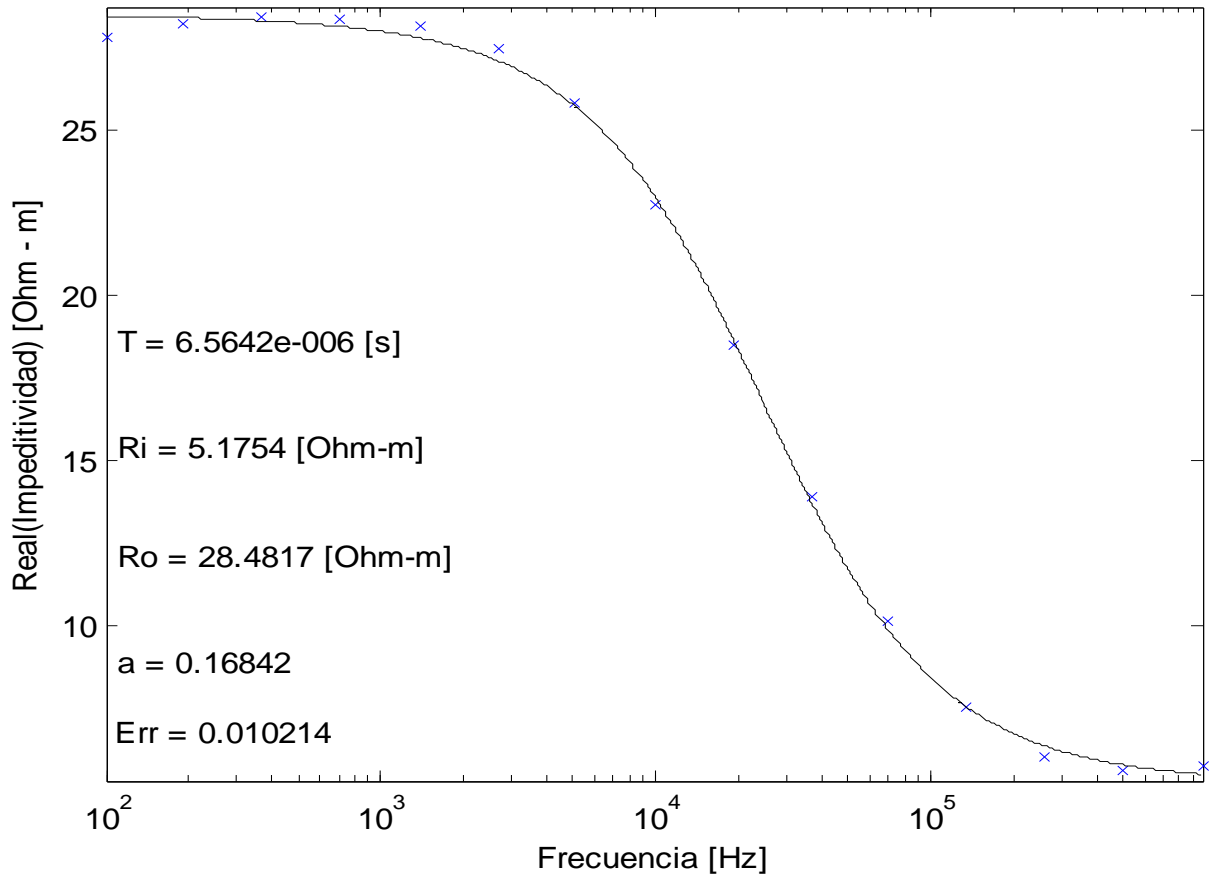


Y15-2 = 43.02 %AL

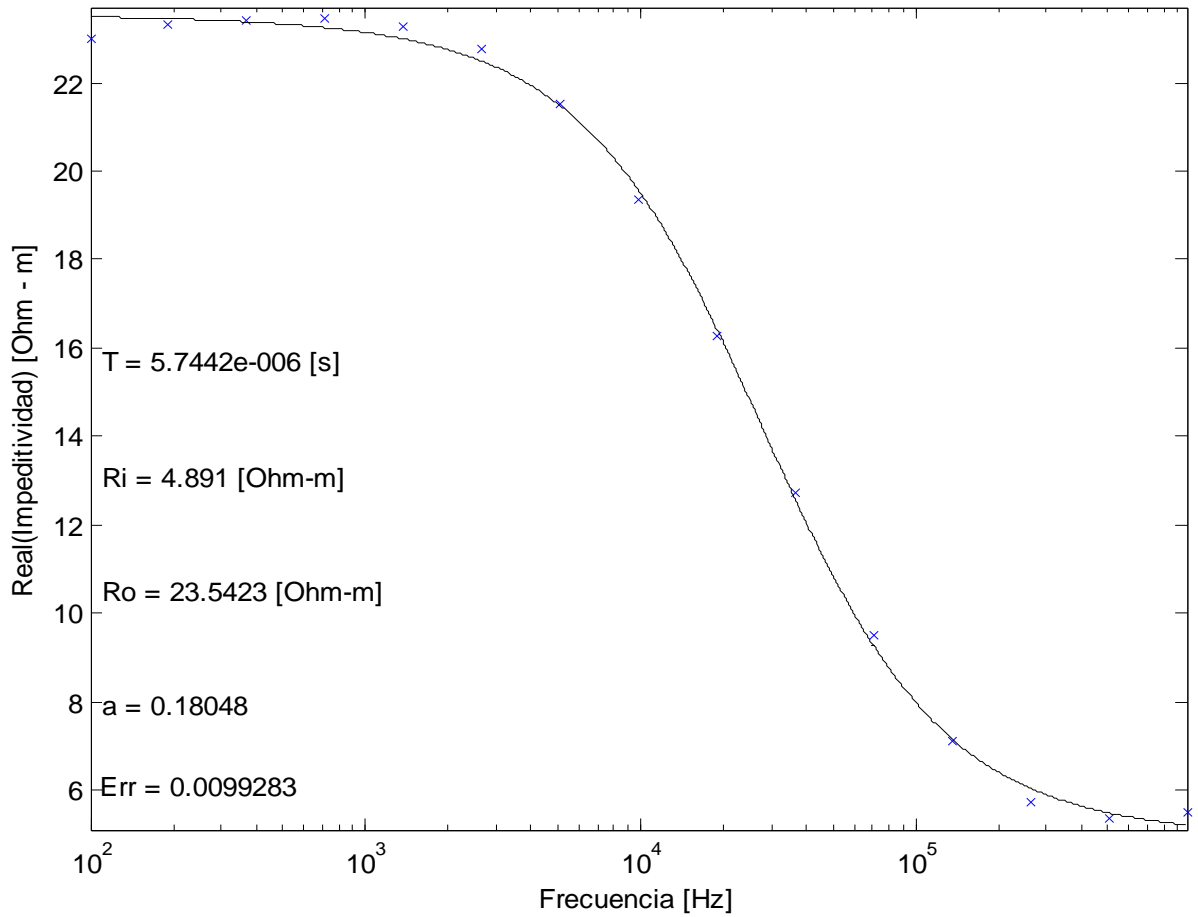




Y15-5 = 43.02 %AL



Y15-6 = 43.02 %AL





**SERVICIOS INTEGRADOS PARA LA
INDUSTRIA DE ALIMENTOS Y EL
MEDIO AMBIENTE**
NIT. 804.016.152-8



REPORTE DE RESULTADOS					
CÓDIGO	R - 051	VERSIÓN	0.0	FECHA	07/01/05

Ciudad y Fecha: Bucaramanga, 20 de Febrero de 2008	
Solicitante: CIAGRO	Nº: 080541
Dirección: Kra. 27 Calle 9 Ciudad Universitaria	Tipo de Muestra: Almidón Soluble Carlo Erba
Teléfono: 6344000	Descripción: Producto Terminado
Nº de lote: //	Fecha de Vencimiento: //
Lugar de Muestreo: Empresa	Solicitud Nº: //
Fecha de Muestreo: 16 de Febrero de 2008	Responsable de Muestreo: Solicitante
Fecha de Análisis: 16 de Febrero de 2008	Tamaño de la Muestra: 5 g
Examen Solicitado: Físicoquímico	Tipo de Empaque o Envase: Plástico

RESULTADOS FISICOQUIMICOS

ANÁLISIS	MÉTODO	RESULTADO	VALORES DE REFERENCIA
ALMIDON	ESPECTROFOTOMETRICO	86,28 %	

Los resultados son válidos para la muestra analizada. No se pueden reproducir sin la previa autorización de SIAMA



ALBIO ENRIQUE ESPINOSA SAFAR
QUIMICO
PQ. 0996

MARTHA CECILIA PATIÑO SOCHA
DIRECTOR TÉCNICO
PQ. 1426



**SERVICIOS INTEGRADOS PARA LA
INDUSTRIA DE ALIMENTOS Y EL
MEDIO AMBIENTE**
NIT. 804.016.152-8



REPORTE DE RESULTADOS					
CÓDIGO	R - 051	VERSIÓN	0.0	FECHA	07/01/05

Ciudad y Fecha: Bucaramanga, 11 de Marzo de 2008

Solicitante: CIAGRO	Nº: 080764
Dirección: Kra. 27 Calle 9 Ciudad Universitaria	Tipo de Muestra: Raíz de Yuca 7310
Teléfono: 6344000	Descripción: Materia Prima
Nº de lote: //	Fecha de Vencimiento: //
Lugar de Muestreo: Empresa	Solicitud Nº: //
Fecha de Muestreo: 07 de Marzo de 2008	Responsable de Muestreo: Solicitante
Fecha de Análisis: 07 de Marzo de 2008	Tamaño de la Muestra: 470 g.
Examen Solicitado: Fisicoquímico	Tipo de Empaque o Envase: Plástico

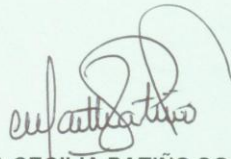
RESULTADOS FISICOQUÍMICOS

ANÁLISIS	NORMA	RESULTADO	VALORES DE REFERENCIA
ALMIDON	ESPECTROFOTOMETRICO	36,65 %	

Los resultados son válidos para la muestra analizada. No se pueden reproducir sin la previa autorización de SIAMA.




ALBIO ENRIQUE ESPINOSA SAFAR
QUÍMICO
PQ. 0996


MARTHA CECILIA PATIÑO SOCHA
DIRECTOR TÉCNICO
PQ. 1426



**SERVICIOS INTEGRADOS PARA LA
INDUSTRIA DE ALIMENTOS Y EL
MEDIO AMBIENTE**
NIT. 804.016.152-8



REPORTE DE RESULTADOS					
CÓDIGO	R - 051	VERSIÓN	0.0	FECHA	07/01/05

Ciudad y Fecha: Bucaramanga, 11 de Marzo de 2008

Nº: 080761

Solicitante: **CIAGRO** Tipo de Muestra: **Raíz de Yuca 7009**

Dirección: Kra. 27 Calle 9 Ciudad Universitaria Descripción: **Materia Prima**

Teléfono: 6344000 Fecha de Vencimiento: //

Nº de lote: // Solicitud Nº: //

Lugar de Muestreo: Empresa Responsable de Muestreo: Solicitante

Fecha de Muestreo: 07 de Marzo de 2008 Tamaño de la Muestra: 610 g.

Fecha de Análisis: 07 de Marzo de 2008 Tipo de Empaque o Envase: Plástico

Examen Solicitado: Físicoquímico


RESULTADOS FÍSICOQUÍMICOS

ANÁLISIS	NORMA	RESULTADO	VALORES DE REFERENCIA
ALMIDON	ESPECTROFOTOMETRICO	40,97 %	

Los resultados son válidos para la muestra analizada. No se pueden reproducir sin la previa autorización de SIAMA.




ALBIO ENRIQUE ESPINOSA SAFAR
QUÍMICO
PQ. 0996


MARTHA CECILIA PATIÑO SOCHA
DIRECTOR TÉCNICO
PQ. 1426



**SERVICIOS INTEGRADOS PARA LA
INDUSTRIA DE ALIMENTOS Y EL
MEDIO AMBIENTE**
NIT. 804.016.152-8



REPORTE DE RESULTADOS					
CÓDIGO	R - 051	VERSION	0.0	FECHA	07/01/05

Ciudad y Fecha: Bucaramanga, 11 de Marzo de 2008

Solicitante: CIAGRO	Nº: 080759
Dirección: Kra. 27 Calle 9 Ciudad Universitaria	Tipo de Muestra: Raíz de Yuca 7311
Teléfono: 6344000	Descripción: Materia Prima
Nº de lote: //	Fecha de Vencimiento: //
Lugar de Muestreo: Empresa	Solicitud Nº: //
Fecha de Muestreo: 07 de Marzo de 2008	Responsable de Muestreo: Solicitante
Fecha de Análisis: 07 de Marzo de 2008	Tamaño de la Muestra: 370 g.
Examen Solicitado: Fisicoquímico	Tipo de Empaque o Envase: Plástico


RESULTADOS FISICOQUÍMICOS

ANÁLISIS	NORMA	RESULTADO	VALORES DE REFERENCIA
ALMIDON	ESPECTROFOTOMETRICO	32,38 %	

Los resultados son válidos para la muestra analizada. No se pueden reproducir sin la previa autorización de SIAMA.




ALBIO ENRIQUE ESPINOSA SAFAR
QUÍMICO
PQ. 0996


MARTHA CECILIA PATIÑO SOCHA
DIRECTOR TÉCNICO
PQ. 1426



**SERVICIOS INTEGRADOS PARA LA
INDUSTRIA DE ALIMENTOS Y EL
MEDIO AMBIENTE**
NIT. 804.016.152-8



REPORTE DE RESULTADOS					
CÓDIGO	R - 051	VERSIÓN	0.0	FECHA	07/01/05

Ciudad y Fecha: Bucaramanga, 11 de Marzo de 2008

Nº: 080763

Solicitante: **CIAGRO** Tipo de Muestra: **Raíz de Yuca 7301**

Dirección: Kra. 27 Calle 9 Ciudad Universitaria Descripción: **Materia Prima**

Teléfono: 6344000 Fecha de Vencimiento: //

Nº de lote: // Solicitud Nº: //

Lugar de Muestreo: Empresa Responsable de Muestreo: **Solicitante**

Fecha de Muestreo: 07 de Marzo de 2008 Tamaño de la Muestra: 340 g.

Fecha de Análisis: 07 de Marzo de 2008 Tipo de Empaque o Envase: **Plástico**

Examen Solicitado: **Fisicoquímico**


RESULTADOS FISICOQUÍMICOS

ANÁLISIS	NORMA	RESULTADO	VALORES DE REFERENCIA
ALMIDON	ESPECTROFOTOMETRICO	40,17 %	400 g

Los resultados son válidos para la muestra analizada. No se pueden reproducir sin la previa autorización de SIAMA.




ALBIO ENRIQUE ESPINOSA SAFAR
QUÍMICO
PQ. 0996


MARTHA CECILIA PATIÑO SOCHA
DIRECTOR TÉCNICO
PQ. 1426



**SERVICIOS INTEGRADOS PARA LA
INDUSTRIA DE ALIMENTOS Y EL
MEDIO AMBIENTE**
NIT. 804.016.152-8



AUTORIZA

Que los análisis de yuca No. 080540, 080541, 080759, 080760, 080761, 080762, 080763, 080764 realizados en el laboratorio se pueden reproducir para la realización de la tesis de grado "MEDICIÓN DEL CONTENIDO DE ALMIDÓN Y MATERIA SECA EN RAICES DE YUCA FRESCA BASADO EN ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA" de autoría de Alberto Elías Alvarez Alvarez con cédula de ciudadanía No. 92.261.748 de Sempués Sucre, con código de estudiante UIS No. 2030729.

Se expide en Bucaramanga a los veintidos (22) días del mes de mayo de dos mil ocho (2008).

Atentamente,



NIT. 804.016.152-8

ALBIO ENRIQUE ESPINOSA SAFAR
Gerente General