



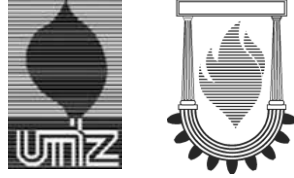
MODELADO DE RESISTIVIDAD Y PH DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES: CAPITALIZACIÓN DEL CONOCIMIENTO DEL SUELO Y CONTRIBUCIÓN AL DESARROLLO DEL SECTOR DE LA PROTECCIÓN ANTICORROSIVA DE LA REPÚBLICA ARGENTINA.

**AUTOR:** RODRÍGUEZ LEANDRO SEBASTIÁN

**DIRECTOR:** PASCAL OSCAR MANUEL

DOCTORADO EN INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOMAS DE ZAMORA  
BUENOS AIRES, ARGENTINA  
DICIEMBRE, 2016





MODELING OF RESISTIVITY AND PH OF THE PROVINCE OF BUENOS AIRES:  
CAPITALIZATION OF SOIL KNOWLEDGE AND IT CONTRIBUTION TO THE  
DEVELOPMENT OF THE ANTI-CORROSION PROTECTION SECTOR OF THE  
ARGENTINE REPUBLIC

**BY: RODRÍGUEZ LEANDRO SEBASTIÁN**

SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE  
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF DOCTOR AT  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOMAS DE ZAMORA  
BUENOS AIRES, ARGENTINA  
DICIEMBRE, 2016



**Don Oscar Pascal**, Profesor Titular de Universidad y Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora.

**AUTORIZA:**

La presentación de la Tesis Doctoral titulada:

Modelado de Resistividad y pH de la provincia de Buenos Aires: Capitalización del conocimiento del suelo y contribución al desarrollo del sector de la protección anticorrosiva de la República Argentina.

Realizada por **Don Rodríguez Leandro Sebastián** bajo su inmediata dirección y supervisión y que presenta para la obtención del grado de Doctor por la Universidad Nacional de Lomas de Zamora.

En Lomas de Zamora, 09 de Diciembre de 2016.

---

Fdo. : Dr. Ing. Oscar Pascal

**Don Oscar Pascal**, Profesor Titular de Universidad y Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora.

**INFORMA:**

Que la presente Tesis Doctoral titulada:

Modelado de Resistividad y pH de la provincia de Buenos Aires: Capitalización del conocimiento del suelo y contribución al desarrollo del sector de la protección anticorrosiva de la República Argentina.

Ha sido realizada por Don Rodríguez Leandro Sebastián bajo la dirección y supervisión de Don Oscar Pascal y que la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora ha dado su conformidad para que sea presentada ante la Comisión de Doctorado.

En Lomas de Zamora, 09 de Diciembre de 2016.

---

Fdo. : Dr. Ing. Oscar Pascal

MODELING OF RESISTIVITY AND PH OF THE PROVINCE OF BUENOS AIRES:  
CAPITALIZATION OF SOIL KNOWLEDGE AND IT CONTRIBUTION TO THE  
DEVELOPMENT OF THE ANTI-CORROSION PROTECTION SECTOR OF THE  
ARGENTINE REPUBLIC

**by** Rodríguez Leandro Sebastián

IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF  
ENGINEERING.

LOMAS DE ZAMORA, DECEMBER OF 2016

---

Fdo. : Dr. Ing. Oscar Pascal

## Dedicado a

A mi esposa,

Noelia

A mis hijos,

Bautista, Benjamín y Victoria.

A mis padres,

Graciela y Miguel Ángel Rodríguez



# Agradecimientos

En el año 2002 inicié mi recorrido académico en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora, con 15 años de edad comencé a cursar mis estudios secundarios en la Escuela Tecnológica Ing. Carlos E. Giudici. Ansioso, con miedos, y sin tener demasiado claro lo que significaba ser técnico en equipos e instalaciones electromecánicas, inicié lo que, posteriormente, se convertiría en mi profesión.

En mi paso por la escuela secundaria, conocí a grandes personas y formadores, el Ing. Horacio Maruzza, Ing. Jorge Campos y Lic. Marcelo Bertoglio quienes contribuyeron a que me interiorice en el mundo de la ingeniería a través de sus vivencias, experiencias y consejos.

En el año 2005, decidí inscribirme en la carrera de Ingeniería Industrial orientación gestión, donde la primera asignatura que cursé fue Introducción a la Ingeniería, con lo cual no es casual que, hoy en día, me desempeñe en ella como jefe de trabajos prácticos.

Durante mi paso por vuestra institución conocí e hice tantos amigos, y compañeros que me acompañaron durante el proceso de formación, que se hace prácticamente imposible nombrarlos a todos, pero sin lugar a dudas, siempre mantendremos los mejores recuerdos de nuestra época de estudiantes.

Una vez finalizados mis estudios universitarios, tuve el honor de formar parte del plantel docente de la Facultad de Ingeniería, dando mis primeros pasos como investigador gracias al IIT&E (Instituto de Investigaciones en Tecnología y Educación) hoy convertido en un "Centro Asociado" de la Comisión de Investigaciones Científicas (CIC). Gracias al esfuerzo y colaboración de todos sus integrantes, donde excelentes personas como la Dra. Marta Comoglio y Dra. Claudia Minnaard, me brindaron todo el apoyo necesario para desarrollarme a lo largo de mi formación académica.

Hoy formando parte del Instituto de Investigaciones en Ingeniería Industrial (I4), siendo también un centro asociado CIC, concluyo mi formación doctoral acompañado por mi director de tesis el Dr. Ing. Oscar Pascal, a quien debo agradecerle, sus miles de consejos, datos, aportes, contactos, y por sobre todo, la paciencia y los mates durante las largas horas de revisión de esta investigación.

No puedo dejar de agradecer a la Lic. Valeria Brunetti por el esfuerzo que puso con sus observaciones y consejos para ayudarme a culminar este trabajo.

Por otra parte, desde que inicie mi formación universitaria en el año 2005, me desempeño en una empresa nacional brindando servicios de ingeniería y protección catódica, llamada Montamar S.R.L. Fue dicha empresa, quien facilitó todos los medios necesarios y datos

disponibles para poder llevar esta investigación adelante. No puedo dejar de recordar a mis compañeros de la oficina de ingeniería, Miguel Rodríguez, Rubén Varela, Sergio Luna, Nicolás Varela y Alejandro Malvacio por sus innumerables aportes y horas abocadas a la materialización de esta investigación.

Me siento afortunado de haber podido formar parte de este proyecto educativo que inicie a mis 15 años dentro de la Facultad de Ingeniería, esperando poder retribuirle todo lo que me han brindado, haciendo mi aporte para poder seguir disponiendo de una universidad pública y de calidad, buscando despertar la pasión por la ingeniería en cada uno de los alumnos que pasan por nuestras aulas.

Quiero hacer un apartado especial a lo mejor que me dejó mi paso por la Facultad de Ingeniería, mi esposa, Noelia Morrongiello, quien me acompañó hasta terminar la carrera, me impulso constantemente a seguir formándome, apoyándome en cada nuevo emprendimiento. Sobre todo, agradecerle, por haberme dado lo más lindo que la vida puede haberme regalado, mis tres hermosos hijos, Bautista, Benjamín y Victoria, quienes me acompañan con sus juegos, risas, entendiendo, a su manera, que papá resigna horas de diversión por ir a la Facultad y escribir algo llamado "tesis".

También, a la familia de mi esposa, que desde su lugar nos ayudó a que esto sea posible, no solo brindando su apoyo, sino también ofreciéndonos una importante contribución desde las tareas cotidianas.

Finalmente, quiero agradecer a mi mamá y mi papá, por hacer de mí y mis hermanos personas con principios, por acompañarme en todos los momentos de mi vida, por inculcarme la vocación por el trabajo, el estudio, y principalmente, por enseñarme que con esfuerzo y dedicación todo se puede lograr.

A todos ustedes, gracias...

# Acknowledgements

In 2002 I started my academic career at the Faculty of Engineering of the National University of Lomas de Zamora, with 15 years old I started to study at Carlos E. Giudici Technology School. Anxious, with fears, and without having too clear what it meant to be technical in electromechanical equipment and installations, I approached my steps in what would later become my profession.

As I passed through high school, I met great people and trainers, Ing. Horacio Maruzza, Ing. Jorge Campos and Lic. Marcelo Bertoglio who helped me to internalize in the world of engineering through their experiences and tips.

In 2005, I decided to enroll in the Industrial Engineering career with a management orientation, where the first course I attended was Introduction to Engineering, which is no coincidence that, nowadays, I work as head of practical work in this professorship.

During my time in the institution I met and made so many friends and colleagues who accompanied me during the training process, which makes it virtually impossible to name them all, but without a doubt, we will always keep the best memories of our student days.

Once I finished my university studies, I had the honor of being part of the teaching staff of the Faculty of Engineering, taking my first steps as a researcher, thanks to the IIT&E (Institute of Research in Technology and Education) today become an "Associated Center" of the Commission for Scientific Research (CIC). Thanks to the efforts and collaboration of all its members, where excellent people such as Dr. Marta Comoglio and Dr. Claudia Minnaard provided me with all the necessary support to develop me throughout my academic training.

Today, as part of the Industrial Engineering Research Institute (I4), as well as an associated CIC center, I conclude my doctoral training, accompanied by my thesis director Dr. Ing. Oscar Pascal, whom I thank for his thousands of tips, data, contributions, contacts, and above all, patience and mates during the long hours of review of this research.

Valeria Brunetti for the effort she made with her observations and advice to help me complete this work.

On the other hand, since starting my university education in 2005, I perform in a national company providing engineering and cathodic protection services, called Montamar S.R.L. It was this company, which provided all necessary means and data available to carry this research forward. I cannot forget to remind my colleagues in the engineering office, Miguel Rodríguez, Ruben Varela, Sergio Luna, Nicolás Varela and Alejandro Malvacio for their innumerable contributions and hours devoted to the materialization of this project.

I feel fortunate to have been part of this educational project that began in my 15 years old in the Faculty of Engineering, hoping to be able to give back everything they have given me, making my contribution to continue to have a public university and quality, seeking to awaken the passion for engineering in each of the students who pass through our classrooms.

I want to make a special section to the best thing that ever happened to me in my way through the Faculty of Engineering, my wife, Noelia Morrongiello, who accompanied me to finish the career, I constantly encourage me to continue forming, supporting me in each new venture. Above all, to thank her for giving me the most beautiful life that could have given me, my three beautiful children, Bautista, Benjamin and Victoria, who accompany me with their games, laughs, understanding, in their own way, that dad resigns hours of fun for going to the university and writing something called "thesis".

Also, to the family of my wife, who helped us to make this possible, not only by providing their support, but also by offering us an important contribution from everyday tasks.

Finally, I want to thank my mom and dad for making me and my brothers people with principles, for accompanying me in all moments of my life, for instilling my vocation for work, study, and especially for teaching me that through effort and dedication everything can be achieved.

To all of you, thank you...

# Resumen

Esta investigación se posiciona como un proyecto de desarrollo y transferencia tecnológica a partir de la necesidad encontrada en una empresa aledaña a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora líder en el rubro de la protección catódica.

El problema de investigación surge por las dificultades que se derivan a la hora de realizar la ingeniería básica de un sistema de protección catódica, en particular en relación a la confección de presupuestos, ya que habitualmente los propietarios de las instalaciones a proteger conocen todos los parámetros técnicos de las mismas, pero no disponen de los datos de resistividad y pH del suelo, los cuales son determinantes para el diseño de los sistemas de protección.

Dado que la resistividad tiene un papel preponderante en el diseño de los sistemas de protección catódica es preciso obtener un conocimiento fiable de este parámetro, lo cual permitirá optimizar las principales variables que definen la eficiencia del sistema (costos, mantenimiento, vida útil, alcance, etc.).

Por tal motivo y a fin de aportar conocimiento en este campo, es que surge el planteo problemático de esta investigación que se puede sintetizar en las siguientes preguntas de investigación:

¿Existe alguna relación entre la resistividad del terreno y profundidad? De existir dicha relación ¿Existe alguna regularidad en la misma?

¿Existe relación entre la resistividad y la ubicación geográfica?

¿La variación del pH en la provincia de Buenos Aires influye en la confección de ingeniería básica para el diseño de sistemas de protección catódica?

Estas preguntas iniciales vinculadas al problema de investigación, son las que dieron lugar a la formulación de la hipótesis de trabajo:

*"El proceso de decisión sobre la instalación de distintos sistemas de protección catódica se ve influenciado por la resistividad del terreno (propiedades eléctricas), su profundidad, pH (propiedades químicas) y su ubicación geográfica."*

Teniendo como objetivo principal modelizar la variabilidad espacial de las propiedades eléctricas y químicas del suelo a diferentes profundidades para contribuir a generar nuevas

herramientas que faciliten la toma de decisiones en el rubro de la protección catódica, disminuyendo la incertidumbre en los procesos de presupuestación de obras.

Se estableció como área para el desarrollo del modelo de esta investigación el ámbito de la provincia de Buenos Aires, como un primer lugar para proponer las mediciones, debido a que es la zona del país donde derivan prácticamente todos los ductos.

Los datos relevados fueron procesados mediante la técnica Kriging Ordinario, la cual demostró ser muy precisa y útil para el desarrollo de este tipo de investigación. Dicho método, junto al software Arcmap, permitieron alcanzar el objetivo propuesto: *"Modelizar la variabilidad espacial de las propiedades eléctricas y químicas del suelo a diferentes profundidades para contribuir a generar nuevas herramientas que faciliten la toma de decisiones en el rubro de la protección catódica, disminuyendo la incertidumbre en los procesos de presupuestación de obras"*.

Finalmente y retomando la hipótesis inicial se puede concluir que se corrobora la hipótesis *"El proceso de decisión sobre la instalación de distintos sistemas de protección catódica se ve influenciado por la resistividad del terreno (propiedades eléctricas), su profundidad, pH (propiedades químicas) y su ubicación geográfica"*, contribuyendo al rubro de la protección catódica entregando como producto de transferencia tecnológica las cartas-mapas provinciales con patente de propiedad intelectual, como herramienta de apoyo para el diseño de sistemas de protección catódica en estructuras de acero enterradas y/o sumergidas.

**Palabras Clave:** Resistividad, pH, Geoestadística, Kriging Ordinario, Buenos Aires, Protección Catódica.

# Abstract

This research is positioned as a project of development and technology transfer from the need found in a company adjacent to the University of Lomas de Zamora leader in cathodic protection.

The research problem born because of the difficulties involved in carrying out the basic engineering of a cathodic protection system, particularly in relation to budgeting, since usually the owners of the installations to be protected know all the technicians parameters, but do not have the data of resistivity and soil pH, which are determinants for the design of the protection systems.

Since resistivity plays a major role in the design of cathodic protection systems, it is necessary to obtain a reliable knowledge of this parameter, which will allow optimizing the main variables that define the efficiency of the system (costs, maintenance, useful life, etc.).

For this reason and in order to contribute knowledge in this field, it is the problematic approach of this research that can be synthesized in the following research questions:

Is there any relationship between the resistivity of the terrain and depth? If there is such a relationship, is there any regularity in it?

Is there a relationship between resistivity and geographic location?

Does the pH variation in the province of Buenos Aires affect the basic engineering design for the design of cathodic protection systems?

These initial questions related to the research problem are those that led to the formulation of the working hypothesis:

"The decision process on the installation of different cathodic protection systems is influenced by the resistivity of the terrain (electrical properties), its depth, pH (chemical properties) and its geographical location."

With the main objective of modeling the spatial variability of the electrical and chemical properties of the soil at different depths to contribute to generate new tools that facilitate decision making in the cathodic protection area, reducing uncertainty in the processes of budgeting works.

The province of Buenos Aires was established as an area for the development of the model of this research, as a first place to propose the measurements, because it is the zone of the country where practically all the ducts derive.

The data surveyed were processed using the Ordinary Kriging technique, which proved to be very precise and useful for the development of this type of research. This method, together with the software Arcmap, allowed us to reach the proposed objective: "Modeling the spatial variability of the electrical and chemical properties of the soil at different depths to contribute to generate new tools that facilitate decision making in the cathodic protection, reducing uncertainty in the processes of budgeting works".

The decision process on the installation of different cathodic protection systems is influenced by the resistivity of the ground (electrical properties), its depth, pH (chemical properties) and its geographic location, contributing to the cathodic protection heading, providing as a technology transfer product the provincial maps-letters with intellectual property patents, as a support tool for the design of cathodic protection systems in underground and / or submerged steel structures .

**Keywords:** Resistivity, pH, Geostatistics, Ordinary Kriging, Buenos Aires, Cathodic Protection.



# Índice general

Resumen.....	XIII
Abstract .....	XV
Capítulo 1 .....	- 1 -
Introducción.....	- 1 -
Capítulo 2 .....	- 4 -
Marco teórico – referencial .....	- 4 -
Electroquímica.....	- 4 -
Potencial estándar de reducción.....	- 5 -
Corrosión.....	- 6 -
Protección catódica.....	- 8 -
Polarización de una estructura .....	- 9 -
Criterios de protección catódica .....	- 10 -
Normativa aplicable en la República Argentina.....	- 11 -
Normativa internacional de otras asociaciones.....	- 11 -
<b>Sistemas de protección catódica.....</b>	<b>- 13 -</b>
Diseño básico de un sistema de protección catódica .....	- 14 -
Resistividad del suelo .....	- 19 -
Método de Wenner.....	- 20 -
pH .....	- 22 -
El suelo .....	- 24 -
Variabilidad del suelo .....	- 27 -
Sistemas de Información Geográfica .....	- 28 -
Geoestadística .....	- 28 -
Método de Interpolación Kriging ordinario .....	- 32 -
Capítulo 3 .....	- 34 -

Marco empírico.....	- 34 -
Diseño metodológico .....	- 34 -
Objetivo general.....	- 34 -
Objetivos específicos.....	- 34 -
Variables.....	- 35 -
Hipótesis de trabajo .....	- 35 -
Muestra .....	- 35 -
Instrumentos de medición, técnicas y software empleado .....	- 38 -
Resistivímetro.....	- 39 -
Electrodo de antimonio.....	- 40 -
Multímetro .....	- 41 -
GPS diferencial .....	- 42 -
Colector de datos Nomad 900G .....	- 43 -
Terrasync.....	- 44 -
Trimble GPS Pathfinder Office .....	- 45 -
ArcMap.....	- 48 -
Procedimiento de recolección y análisis de muestras.....	- 48 -
Investigación previa .....	- 48 -
Diseño del levantamiento de datos .....	- 48 -
Proceso de recolección de muestras.....	- 50 -
Proceso de análisis de datos .....	- 55 -
Capítulo 4 .....	- 58 -
Resultados y Discusión.....	- 58 -
Resistividad a 1 metro de profundidad - (R1) .....	- 59 -
Análisis exploratorio.....	- 59 -
Determinación de la normalidad de la muestra - (R1).....	- 59 -
Coeficiente de variación - (R1) .....	- 60 -

Valores atípicos - (R1).....	- 63 -
Análisis estructural de los datos - (R1).....	- 70 -
Resistividad a 2 metros de profundidad - (R2).....	- 77 -
Análisis exploratorio.....	- 77 -
Determinación de la normalidad de la muestra - (R2).....	- 77 -
Coefficiente de variación - (R2) .....	- 78 -
Valores atípicos - (R2).....	- 79 -
Coefficiente de variación sin valor atípico extremo - (R2) .....	- 85 -
Análisis estructural de los datos - (R2).....	- 87 -
pH .....	- 92 -
Análisis exploratorio.....	- 92 -
Determinación de la normalidad de la muestra – (pH).....	- 92 -
Coefficiente de variación – (pH) .....	- 92 -
Valores atípicos – (pH) .....	- 93 -
Análisis estructural de los datos – (pH).....	- 94 -
Conclusión .....	- 101 -
Recomendaciones.....	- 103 -
Bibliografía.....	- 104 -
Anexos.....	- 110 -

# Índice de ilustraciones

Ilustración 1 - Celda Galvánica .....	- 5 -
Ilustración 2- Proceso electroquímico implicado en la formación de óxido .....	- 7 -
Ilustración 3 – Celda de corrosión microscópica sobre tubería .....	- 8 -
Ilustración 4 – Protección catódica aplicada a una estructura .....	- 9 -
Ilustración 5 – Polarización de una estructura.....	- 9 -
Ilustración 6 – Electrodo de referencia cobre sulfato de cobre en contacto con la tierra ...	- 10 -
Ilustración 7 – Protección catódica por ánodos galvánicos .....	- 13 -
Ilustración 8 – Protección catódica por corriente impresa .....	- 14 -
Ilustración 9 - Capacidad de Corriente para la Aleación de Magnesio AZ63 vs. Densidad de la Corriente .....	- 18 -
Ilustración 10 – Medición de resistividad por el método de las 4 puntas de Wenner .....	- 20 -
Ilustración 11 – Efecto de la disminución del pH .....	- 23 -
Ilustración 12 - Rango de valores de mediana de pH del horizonte superficial (0-20cm de profundidad) de suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana. Interpolación realizada con el método Kriging .....	- 24 -
Ilustración 13 - Órdenes de suelos.....	- 26 -
Ilustración 14- Esquema de un semivariograma.....	- 31 -
Ilustración 15 - Resistímetro Megabras 20 MTD20Kwe.....	- 39 -
Ilustración 16 - Electrodo de antimonio .....	- 40 -
Ilustración 17 - Simulación de medición de pH en batea.....	- 41 -
Ilustración 18 - Multímetro FLUKE 77 .....	- 42 -
Ilustración 19 - Receptor Trimble PRO XRT .....	- 43 -
Ilustración 20 - NOMAD 900G.....	- 44 -
Ilustración 21 - Terrasync Profesional 5.0.....	- 45 -
Ilustración 22 - Captura de Trimble Pathfinder Office, diseño de diccionario para relevamiento de campo .....	- 47 -
Ilustración 23 - División de áreas de la Provincia de Buenos Aires.....	- 49 -
Ilustración 24 - Procedimiento de recolección de muestras.....	- 50 -
Ilustración 25 - Conexión de resistímetro.....	- 51 -
Ilustración 26 - Medición de resistividad en campo .....	- 52 -
Ilustración 27 - Medición de resistividad zona anegada .....	- 53 -
Ilustración 28 - Medición de pH en terreno .....	- 54 -
Ilustración 29 - Almacenamiento de datos en NOMAD 900 - Trimble PRO-XRT .....	- 54 -
Ilustración 30 - Proceso de análisis de datos .....	- 55 -
Ilustración 31 - Visualización de muestras en Trimble GPS Pathfinder Office.....	- 56 -

Ilustración 32 - Puntos Muestreados Resistividad y pH .....	- 58 -
Ilustración 33 – Histograma, variable "Resistividad a 1 metro de profundidad" .....	- 59 -
Ilustración 34 - Histograma, variable "Resistividad a 1 metro de profundidad" con transformación logarítmica" .....	- 60 -
Ilustración 35 - Valor normal estándar, variable "Resistividad a 1 metro de profundidad" .	- 61 -
Ilustración 36 - Gráfico de tendencia, variable "Resistividad a 1 metro de profundidad" ...	- 62 -
Ilustración 37 – Boxplot variable "Resistividades a 1 metro de profundidad" .....	- 63 -
Ilustración 38 - Valores atípicos Resistividad a 1 metro .....	- 64 -
Ilustración 39 - Geolocalización de valores atípicos variable "Resistividad a 1 metro de profundidad" .....	- 65 -
Ilustración 40 - Valor extremo de variable "Resistividad a 1 metro de profundidad" localizada en el partido de Villarino.....	- 66 -
Ilustración 41 – Imagen satelital de valor extremo de variable "Resistividad a 1 metro de profundidad" localizada en el partido de Villarino .....	- 67 -
Ilustración 42 - Valores extremos de variable "Resistividad a 1 metro de profundidad" localizados en los partidos de Pehuajo y Saliquelo.....	- 68 -
Ilustración 43 - Imágenes satelitales de valores extremos de variable "Resistividad a 1 metro de profundidad" localizados en los partidos de Pehuajo y Saliquelo .....	- 68 -
Ilustración 44 - Valores extremos de variable "Resistividad a 1 metro de profundidad" localizados en la costa de la provincia de Buenos Aires.....	- 69 -
Ilustración 45 - Imágenes satelitales de valores extremos de variable "Resistividad a 1 metro de profundidad" localizados en la costa de la provincia de Buenos Aires .....	- 69 -
Ilustración 46 - Geostatistical Wizard: Kriging .....	- 70 -
Ilustración 47 - Geostatistical Wizard: Kriging, tipo de transformación y orden tendencia .	- 71 -
Ilustración 48 - Geostatistical Wizard: Semivariograma .....	- 72 -
Ilustración 49 - Geostatistical Wizard: Selección de vecinos y sector de búsqueda .....	- 72 -
Ilustración 50 - Gráfico de valores medidos vs predicción, variable "Resistividad a 1 metro de profundidad" .....	- 73 -
Ilustración 51 - Gráfico de valores medidos vs error, variable "Resistividad a 1 metro de profundidad" .....	- 73 -
Ilustración 52 - Mapa de resistividad a 1 metro de profundidad de la Provincia de Bs. As.	- 75 -
Ilustración 53 - Predicción del error de resistividad a 1 metro de profundidad de la Provincia de Buenos Aires.....	- 76 -
Ilustración 54 – Histograma, variable "Resistividad a 2 metros de profundidad" .....	- 77 -
Ilustración 55 – Histograma, variable "Resistividad a 2 metros de profundidad" con transformación logarítmica .....	- 77 -
Ilustración 56 - Valor normal estándar, variable resistividad a 2 metros de profundidad ...	- 78 -
Ilustración 57 - Gráfico de tendencia, variable "Resistividad a 2 metros de profundidad" ..	- 78 -
Ilustración 58 – Boxplot, variable "Resistividad a 2 metros de profundidad" .....	- 79 -

Ilustración 59 - Valores atípicos Resistividad a 2 metros de profundidad .....	- 80 -
Ilustración 60 – Geolocalización de valores atípicos variable "Resistividad a 2 metros de profundidad" .....	- 81 -
Ilustración 61 - Valor extremo de variable "Resistividad a 2 metros de profundidad" localizado en el partido de General Pueyrredon .....	- 82 -
Ilustración 63 - Imagen satelital de valores extremos de variable "Resistividad a 2 metros de profundidad" localizado en ingreso al Aeropuerto Internacional Ástor Piazzolla .....	- 82 -
Ilustración 63 - Ingreso Aeropuerto Internacional Ástor Piazzolla, zona de relevamiento de valor atípico extremo.....	- 83 -
Ilustración 64 - Valores extremos de variable "Resistividad a 2 metros de profundidad" localizados en los partidos de Salto, Capitán Sarmiento y Carmen de Areco .....	- 84 -
Ilustración 65 – Histograma, variable "Resistividad a 2 metros de profundidad" sin valor atípico extremo.....	- 84 -
Ilustración 66 – Histograma, variable "Resistividad a 1 metro de profundidad con transformación logarítmica" sin valor atípico extremo .....	- 85 -
Ilustración 67 - Valor normal estándar de variable "Resistividad a 2 metros de profundidad" sin valor atípico extremo .....	- 86 -
Ilustración 68 - Gráfico de tendencia, variable "Resistividad a 2 metros de profundidad" sin valor atípico extremo.....	- 86 -
Ilustración 69 - Geostatistical Wizard: Semivariograma, variable "Resistividad a 2 metros de profundidad" .....	- 88 -
Ilustración 70 - Gráfico de valores medidos vs predicción, variable "Resistividad a 2 metros de profundidad" .....	- 89 -
Ilustración 71 - Gráfico de valores medidos vs error, variable "Resistividad a 2 metros de profundidad" .....	- 89 -
Ilustración 72 - Mapa de resistividad a 2 metros de profundidad de la Provincia de Buenos Aires .....	- 90 -
Ilustración 73 - Predicción del error de resistividad a 2 metros de profundidad de la Provincia de Buenos Aires.....	- 91 -
Ilustración 74 - Histograma, variable "pH" .....	- 92 -
Ilustración 75 – Boxplot, variable "pH" .....	- 93 -
Ilustración 76 - Valor normal estándar de variable pH .....	- 93 -
Ilustración 77 - Gráfico de tendencia, variable "pH" .....	- 94 -
Ilustración 78 - Geostatistical Wizard: Kriging, tipo de transformación y orden de la tendencia, variable "pH" .....	- 95 -
Ilustración 79 - Geostatistical Wizard: Semivariograma, variable "pH" .....	- 96 -
Ilustración 80 - Geostatistical Wizard: Selección de vecinos y formato de sector de búsqueda, variable "pH" .....	- 97 -
Ilustración 81 - Gráfico de valores medidos vs predicción, variable "pH".....	- 98 -

Ilustración 82 - Gráfico de valores medidos vs error, variable "pH" .....	- 98 -
Ilustración 83 - Mapa de pH de la Provincia de Buenos Aires .....	- 99 -
Ilustración 84 - Predicción del error del pH de la Provincia de Buenos Aires.....	- 100 -

# Índice de tablas

Tabla 1 – Potencial de reducción estándar a 25°C .....	- 6 -
Tabla 2 – Valores relativos de electrodos de referencia vs del electrodo de Hidrogeno .....	- 11 -
Tabla 3 - Características y atributos diccionario de datos.....	- 47 -
Tabla 4 – Fragmento de planilla de procesamiento de datos.....	- 57 -
Tabla 5 - Cálculo de error y recta de regresión .....	- 73 -
Tabla 6 - Cálculo de error y recta de regresión variable "Resistividad a 2 metros de profundidad.....	- 88 -
Tabla 7 - Cálculo de error "pH" .....	- 97 -



# Capítulo 1

## Introducción

Esta investigación se posiciona como un proyecto de desarrollo y transferencia tecnológica, a partir de un acuerdo histórico celebrado entre el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), la Comisión Nacional de Evaluación y Acreditación Universitaria (CONEAU) y el Consejo Federal de Decanos de Facultades de Ingeniería (CONFEDI), el día 3 de agosto de 2016 donde se estableció que todos aquellos trabajos de tesis doctoral que comprendan soluciones novedosas a demandas industriales, con resultados protegibles a través de la propiedad industrial, convenios de desarrollo e innovación tecnológica con empresas son condición suficiente para validar un proyecto de tesis doctoral. Por tal motivo y a partir de la necesidad encontrada en una empresa aledaña a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora, conformada por alumnos y graduados de esta casa de altos estudios, es que se procede a iniciar esta investigación.

Montamar S.R.L. es una empresa Argentina, radicada en el partido de Lomas de Zamora, con proyección internacional. Nació del encuentro de un grupo de profesionales con gran experiencia y extensa trayectoria en la industria del gas y petróleo, desempeñándose fundamentalmente en el área específica de protección catódica y anticorrosiva. Entre sus principales clientes se encuentran YPF, Transportadora de Gas del Norte, Transportadora de Gas del Sur, Camuzzi Gas, Ecogas, Pluspetrol, Metrogas Chile, etc.

El problema de investigación surge por las dificultades que se derivan a la hora de realizar la ingeniería básica de un sistema de protección catódica, en particular en relación a la confección de presupuestos. Un factor fundamental para el armado y cálculo de un sistema de protección catódica es poder conocer la resistividad y pH del suelo. Es importante resaltar que la resistividad tiene la capacidad modificar el diseño de un sistema de protección catódica y por ende la cantidad de material galvánico a instalar. Sin embargo ante el desconocimiento de los propietarios de las instalaciones de los mismos y la negativa habitual de contratar un servicio de estudios complementarios en campo para poder determinar un presupuesto lo más ajustado posible, se torna necesario poder conocer a priori el pH y las resistividades aproximadas del terreno a profundidades de 1 y 2 metros.

Por tal motivo y a fin de aportar conocimiento en este campo, es que surge el planteo problemático de esta investigación que se puede sintetizar en las siguientes preguntas de investigación:

¿Existe alguna relación entre la resistividad del terreno y profundidad? De existir dicha relación ¿Existe alguna regularidad en la misma?

¿Existe relación entre la resistividad y la ubicación geográfica?

¿La variación del pH en la provincia de Buenos Aires influye en la confección de ingeniería básica para el diseño de sistemas de protección catódica?

Estas preguntas iniciales vinculadas al problema de investigación, son las que dieron lugar a la formulación de la hipótesis de trabajo:

### **Hipótesis de trabajo**

*"El proceso de decisión sobre la instalación de distintos sistemas de protección catódica se ve influenciado por la resistividad del terreno (propiedades eléctricas), su profundidad, pH (propiedades químicas) y su ubicación geográfica."*

### **Objetivo general**

Modelizar la variabilidad espacial de las propiedades eléctricas y químicas del suelo a diferentes profundidades para contribuir a generar nuevas herramientas que faciliten la toma de decisiones en el rubro de la protección catódica, disminuyendo la incertidumbre en los procesos de presupuestación de obras.

### **Objetivos específicos**

- Determinar las propiedades eléctricas (resistividad a 1 y 2 metros de profundidad), químicas (pH a 20 cm de la superficie) y su distribución espacial.
- Identificar mediante la elaboración de mapas temáticos, la distribución espacial y caracterización de los atributos del suelo para resistividades a 1 y 2 metros de profundidad.
- Actualizar los mapas existentes de pH de la provincia de Buenos Aires.
- Contribuir a definir la geomorfología de la provincia de Buenos Aires a partir de las mediciones efectuadas.
- Establecer una metodología para el tratamiento de los datos que presentan distribución espacial.

Se estableció como área para el desarrollo del modelo de esta investigación el ámbito de la provincia de Buenos Aires, como un primer lugar para proponer las mediciones, debido a que es la zona del país donde derivan prácticamente todos los ductos, esperando en un futuro esta investigación sirva de base para poder extrapolar el modelo a todo el territorio nacional. La provincia de Buenos Aires, dispone una superficie total de 307.771 Km<sup>2</sup> y se recorrieron más de 10.000 Km para efectuar las distintas mediciones.

Una apretada síntesis de las principales concepciones que aborda esta investigación se resumen a continuación:

Inicia con conceptos básicos de electroquímica y potencial estándar de reducción para poder comprender qué es la corrosión y más precisamente la protección catódica. Junto a la normativa nacional e internacional establecida para lograr un correcto mantenimiento de todas las estructuras metálicas enterradas y/o sumergidas, denotando aquellas que hacen especial injerencia a los cambios en la resistividad del terreno, modificando los criterios de protección establecidos. Se hace una breve reseña de los distintos sistemas de protección catódica (galvánico y por corriente impresa) y los cálculos necesarios para el diseño de los mismos a fin de poder demostrar como una variación en la resistividad puede modificar completamente los resultados de la cantidad de material galvánico a instalar y por ende el costo del presupuesto de instalación. Avanzando en el desarrollo del marco teórico se encuentran las técnicas de medición utilizadas, para la medición de resistividades a 1 y 2 metros se empleó la técnica de las 4 puntas de Wenner y para medir el pH se utilizó un electrodo de Antimonio. Sin embargo no es posible realizar un estudio de esta magnitud sin conocer como está conformado el suelo de la provincia de Buenos Aires y la variabilidad del mismo. Debido a las dimensiones de la provincia de Buenos Aires es necesario la geolocalización de cada una de las muestras, por lo que requiere establecer una técnica de procesamiento de datos que considere la ubicación geográfica de cada una de las muestras, optando por utilizar el método de interpolación Kriging Ordinario para el procesamiento de los mismos.

Ya dentro del marco empírico se establece la metodología utilizada para la recolección de muestras, técnicas, instrumentos de medición y software necesarios. Se recorrió todo el territorio de la provincia de Buenos Aires utilizando vehículos 4x4, realizando las mediciones de resistividad y pH. Estos datos se almacenaron en un GPS, con precisión submétrica y los fueron procesados utilizando los software: GPS Trimble Pathfinder Office, Excel y Arcmap para la confección final de los mapas.

## Capítulo 2

### Marco teórico – referencial

Antes de poder combatir eficazmente la corrosión, es necesario conocer contra qué se está luchando. Por lo tanto hay que preguntarse ¿Qué es la corrosión?

Cuando se habla de corrosión lo primero que uno imagina es el deterioro de un material, usualmente un metal, producto de una reacción con el medioambiente.

Según la norma ISO-8044-2015 es una interacción físico química entre un metal y su medioambiente la cual resulta en cambios en las propiedades del metal y puede frecuentemente conducir a un deterioro de la función del metal, el medioambiente, o el sistema técnico del cual estos forman parte [1].

La IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) amplía la definición anterior considerando que la corrosión es una reacción superficial irreversible de un material (metal, cerámico o polimérico) con su entorno que resulta en la consunción del material o en la disolución dentro del material de un componente del entorno. Normalmente, pero no necesariamente, la corrosión provoca efectos que van en detrimento del uso del material considerado. Los procesos exclusivamente físicos o mecánicos como la fusión o evaporación, abrasión o fractura mecánica no se engloban dentro del término corrosión [2].

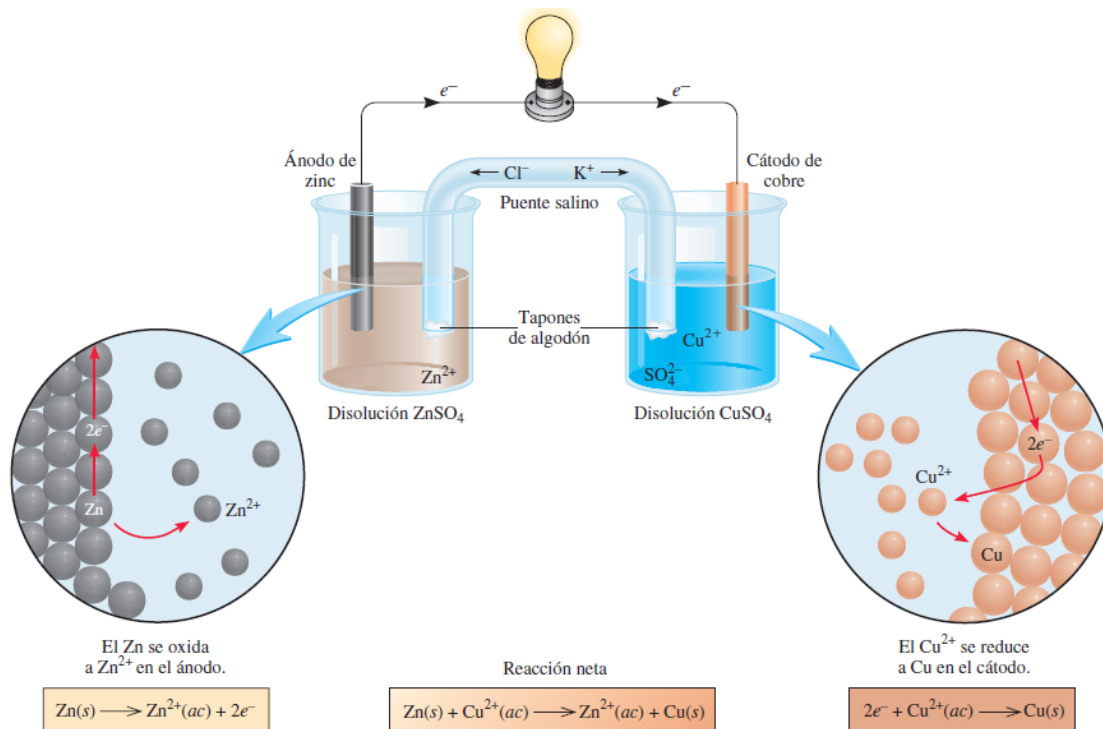
A partir de las definiciones anteriores se observa que corrosión hoy en día ya no solo significa "oxidación de un metal", sino que se involucran prácticamente todos los materiales metálicos y no metálicos, usados en todo tipo de industria, y su definición involucra toda "degradación o pérdida de función de un componente por exposición al medioambiente".

La corrosión es una reacción química a la que algunos llaman oxidación y otros dicen que es un fenómeno electrolítico, en forma parcial cada una de estas afirmaciones es correcta. Se puede definir como el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico del medio que lo rodea. Puede entenderse como la tendencia general que tienen los materiales a buscar su forma más estable o de menor energía interna.

#### Electroquímica

La electroquímica estudia la relación entre la energía eléctrica y la energía química. Son reacciones de oxidación y reducción, donde la energía liberada por la reacción se convierte en electricidad o donde se utiliza la energía eléctrica para producir una reacción no espontánea.

Para ejemplificarlo se puede utilizar un dispositivo experimental para generar electricidad a través de la creación de una celda galvánica:



**Ilustración 1 - Celda Galvánica - Fuente: Raymond, Chang (2010)**

En la ilustración 1 se puede observar una celda galvánica formada por una barra de Zinc metálico (ánodo) sumergido en una solución de  $ZnSO_4$  y una de cobre (cátodo) se sumerge en una solución de  $CuSO_4$ . El funcionamiento de la celda se basa en el principio de que la oxidación de Zn a  $Zn^{2+}$  y la reducción de  $Cu^{2+}$  a Cu se pueden llevar a cabo simultáneamente, pero en recipientes separados, con la transferencia de electrones a través de un alambre conductor externo. La corriente eléctrica fluye del ánodo al cátodo porque existe una gran diferencia de energía potencial eléctrica entre los electrodos [3].

## Potencial estándar de reducción

El potencial de reducción es la tendencia que tienen los elementos químicos en una reacción a adquirir electrones. Se produce cuando reaccionan dos semiceldas que no están en equilibrio y se puede medir en mili volts [mV]. Es imposible medir el potencial de un solo electrodo pero si arbitrariamente se le asigna valor cero a un electrodo en particular, éste se puede usar para determinar los potenciales relativos de otros electrodos. El electrodo de Hidrógeno a  $25^{\circ}C$  sirve para este fin [3].

Semirreacción	E°(V)
$F_2(g) + 2e^- \longrightarrow 2F^-(ac)$	+2.87
$O_3(g) + 2H^+(ac) + 2e^- \longrightarrow O_2(g) + H_2O$	+2.07
$Co^{3+}(ac) + e^- \longrightarrow Co^{2+}(ac)$	+1.82
$H_2O_2(ac) + 2H^+(ac) + 2e^- \longrightarrow 2H_2O$	+1.77
$PbO_2(s) + 4H^+(ac) + SO_4^{2-}(ac) + 2e^- \longrightarrow PbSO_4(s) + 2H_2O$	+1.70
$Ce^{4+}(ac) + e^- \longrightarrow Ce^{3+}(ac)$	+1.61
$MnO_4^-(ac) + 8H^+(ac) + 5e^- \longrightarrow Mn^{2+}(ac) + 4H_2O$	+1.51
$Au^{3+}(ac) + 3e^- \longrightarrow Au(s)$	+1.50
$Cl_2(g) + 2e^- \longrightarrow 2Cl^-(ac)$	+1.36
$Cr_2O_7^{2-}(ac) + 14H^+(ac) + 6e^- \longrightarrow 2Cr^{3+}(ac) + 7H_2O$	+1.33
$MnO_2(s) + 4H^+(ac) + 2e^- \longrightarrow Mn^{2+}(ac) + 2H_2O$	+1.23
$O_2(g) + 4H^+(ac) + 4e^- \longrightarrow 2H_2O$	+1.23
$Br_2(l) + 2e^- \longrightarrow 2Br^-(ac)$	+1.07
$NO_3^-(ac) + 4H^+(ac) + 3e^- \longrightarrow NO(g) + 2H_2O$	+0.96
$2Hg^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Hg_2^{2+}(ac)$	+0.92
$Hg_2^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow 2Hg(l)$	+0.85
$Ag^+(ac) + e^- \longrightarrow Ag(s)$	+0.80
$Fe^{3+}(ac) + e^- \longrightarrow Fe^{2+}(ac)$	+0.77
$O_2(g) + 2H^+(ac) + 2e^- \longrightarrow H_2O_2(ac)$	+0.68
$MnO_4^-(ac) + 2H_2O + 3e^- \longrightarrow MnO_2(s) + 4OH^-(ac)$	+0.59
$I_2(s) + 2e^- \longrightarrow 2I^-(ac)$	+0.53
$O_2(g) + 2H_2O + 4e^- \longrightarrow 4OH^-(ac)$	+0.40
$Cu^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Cu(s)$	+0.34
$AgCl(s) + e^- \longrightarrow Ag(s) + Cl^-(ac)$	+0.22
$SO_4^{2-}(ac) + 4H^+(ac) + 2e^- \longrightarrow SO_2(g) + 2H_2O$	+0.20
$Cu^{2+}(ac) + e^- \longrightarrow Cu^+(ac)$	+0.15
$Sn^{4+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Sn^{2+}(ac)$	+0.13
$2H^+(ac) + 2e^- \longrightarrow H_2(g)$	0.00
$Pb^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Pb(s)$	-0.13
$Sb^{3+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Sb(s)$	-0.14
$Ni^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Ni(s)$	-0.25
$Co^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Co(s)$	-0.28
$PbSO_4(s) + 2e^- \longrightarrow Pb(s) + SO_4^{2-}(ac)$	-0.31
$Cd^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Cd(s)$	-0.40
$Fe^{3+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Fe(s)$	-0.44
$Cr^{3+}(ac) + 3e^- \longrightarrow Cr(s)$	-0.74
$Zn^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Zn(s)$	-0.76
$2H_2O + 2e^- \longrightarrow H_2(g) + 2OH^-(ac)$	-0.83
$Mn^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Mn(s)$	-1.18
$Al^{3+}(ac) + 3e^- \longrightarrow Al(s)$	-1.66
$Be^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Be(s)$	-1.85
$Mg^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Mg(s)$	-2.37
$Na^+(ac) + e^- \longrightarrow Na(s)$	-2.71
$Ca^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Ca(s)$	-2.87
$Sr^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Sr(s)$	-2.89
$Ba^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Ba(s)$	-2.90
$K^+(ac) + e^- \longrightarrow K(s)$	-2.93
$Li^+(ac) + e^- \longrightarrow Li(s)$	-3.05

Tabla 1 – Potencial de reducción estándar a 25°C – Fuente: Raymond, Chang (2010)

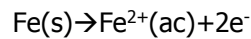
## Corrosión

Según R. Chang [3] la corrosión es el término que suele aplicarse al deterioro de los metales por un proceso electroquímico.

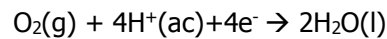
Para B. y A.W. Peabody [4], se puede decir que el proceso de corrosión tal como se encuentra normalmente en el trabajo de cañerías es básicamente de naturaleza electroquímica y que es necesaria la presencia de oxígeno en alguna forma.

Ambos autores coinciden en que la misma provoca daños considerables en edificios, puentes, barcos, vehículos y cañerías.

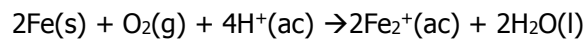
Un ejemplo típico es la oxidación del hierro. Para que el metal se oxide debe estar en contacto con oxígeno y agua. Una parte de la superficie del metal funciona como ánodo donde se lleva a cabo la oxidación:



Los electrodos donados por el hierro reducen el oxígeno atmosférico a agua en el cátodo, que a su vez es otra región de la misma superficie del metal:



La reacción redox global es:

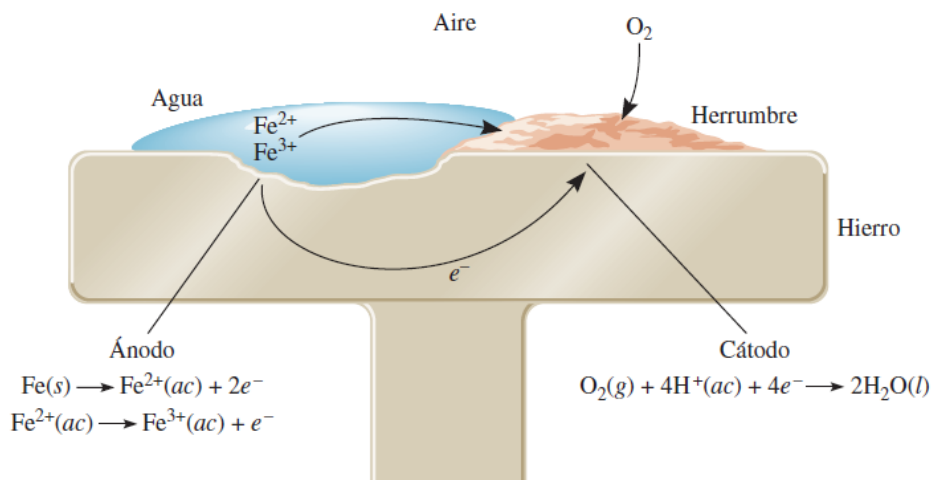


Con los datos de la tabla 1 se puede calcular la fuerza electromotriz estándar para este proceso:

$$E^{\circ}_{\text{Celda}} = E^{\circ}_{\text{Cátodo}} - E^{\circ}_{\text{Ánodo}}$$

$$E^{\circ}_{\text{Celda}} = 1.23\text{V} - (-0.44\text{V})$$

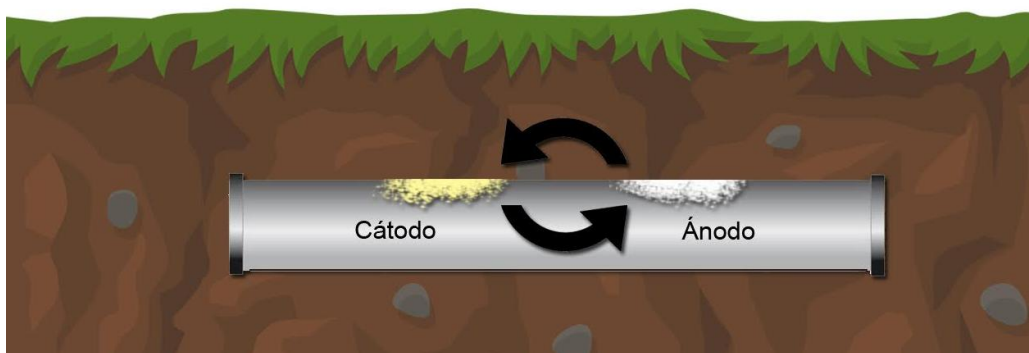
$$E^{\circ}_{\text{Celda}} = 1.67\text{V}$$



**Ilustración 2– Proceso electroquímico implicado en la formación de óxido - Fuente: Raymond, Chang (2010)**

## Protección catódica

La corrosión se produce a partir de una reacción del tipo electroquímica originada por la diferencia de potencial entre los electrodos (ánodo y cátodo), vinculados eléctricamente y sumergidos en el mismo electrolito. Dentro de un sistema de protección catódica el metal que va a ser protegido contra la corrosión se transforma en el cátodo de una celda galvánica. La corrosión en cañerías metálicas subterráneas puede evitarse o reducirse, conectándolas a metales que se oxiden más fácilmente que el hierro [5].

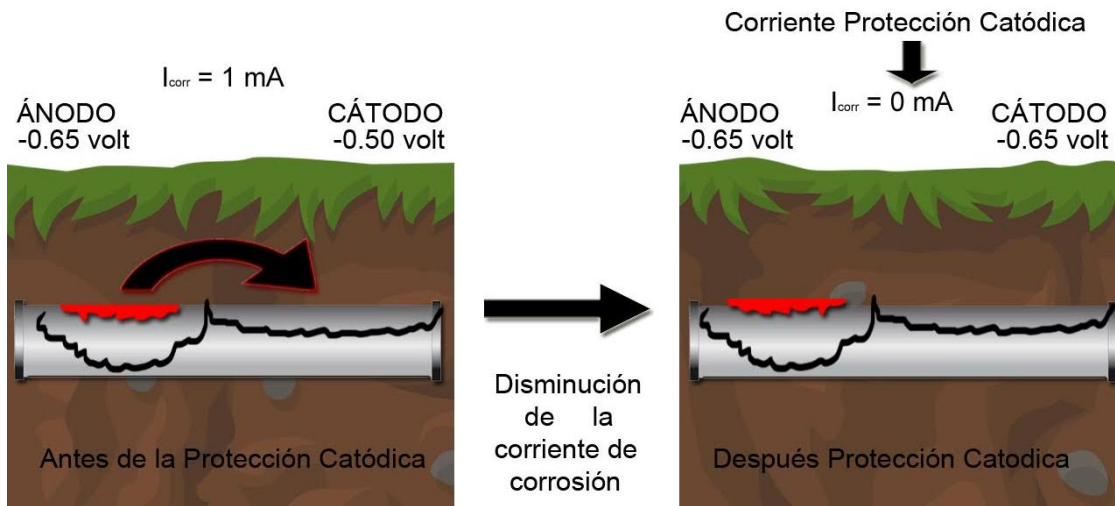


**Ilustración 3 – Celda de corrosión microscópica sobre tubería - Fuente: Elaboración propia en base a NACE International cathodic protection technician**

Según la Asociación de Ingenieros de Corrosión de Estados Unidos, en adelante "NACE" (autoridad global de corrosión) el concepto de protección catódica busca reducir diferencia de potencial entre los sitios anódicos y catódicos lo más cercano a cero posible, obteniendo como resultado cero corriente de corrosión.

Esto es posible imprimiendo corriente a la estructura a través de un electrodo externo y logrando polarizar los sitios catódicos en dirección electronegativa. Finalmente cuando el potencial de todos los sitios catódicos se polarizan hacia el potencial de los sitios anódicos se reduce la corriente de corrosión. Cuando el potencial de todos los sitios catódicos alcanza el potencial de los sitios anódicos más activos, se elimina la corrosión de la estructura a proteger, tal como se puede observar en la Ilustración 4 [5].

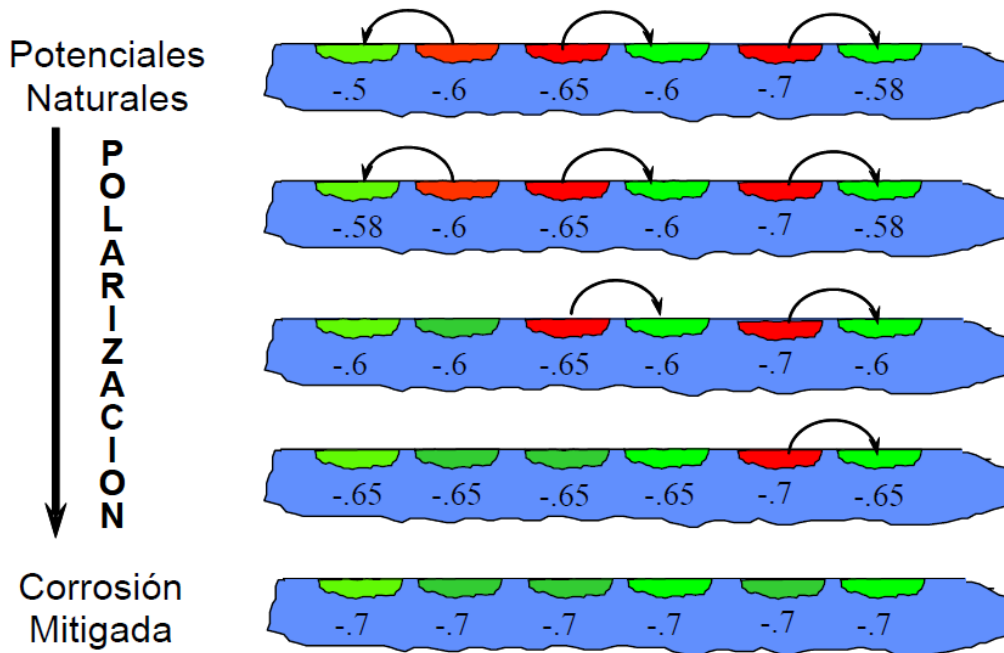




**Ilustración 4 – Protección catódica aplicada a una estructura - Fuente: Elaboración propia en base NACE International cathodic protection technician**

### Polarización de una estructura

La protección catódica es un fenómeno de polarización y la polarización es un cambio de potencial por efecto de la circulación de corriente [5]. Esta corriente circulante cambia la composición química del electrolito en la interface estructura/electrolito, cuando esta deja de ser suministrada se disipa de una forma similar a la descarga un capacitor, pero puede que nunca llegue al valor de potencial natural.



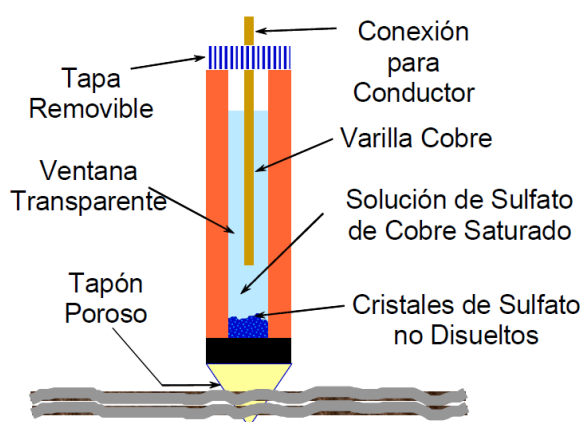
**Ilustración 5 – Polarización de una estructura - Fuente: NACE International cathodic protection technician**

Según NACE [5], para mitigar el efecto de la corrosión, todos los sitios catódicos deben polarizarse en dirección electronegativa hasta alcanzar el potencial a circuito abierto del ánodo más activo de la estructura como se puede observar en la Ilustración 5.

El verdadero criterio para eliminar la corrosión es la polarización de los cátodos al potencial a circuito abierto de los ánodos. Sin embargo, a los fines prácticos es imposible determinar el potencial a circuito abierto del sitio anódico más activo. Consiguientemente se han desarrollado criterios alternativos para acercarse al criterio verdadero [5].

## Criterios de protección catódica

Para la medición de potencial entre la estructura y el suelo en sistemas de protección catódica, lo más habitual es utilizar un electrodo de cobre-sulfato de cobre. El electrodo se encuentra conformado por un cilindro acrílico con un tapón poroso en su extremo y dentro se ubica una varilla de cobre inmersa en una solución saturada de sulfato de cobre. Los iones de cobre en solución saturada evitan la corrosión de la varilla de cobre y buscan estabilizar el electrodo de referencia.



**Ilustración 6 – Electrodo de referencia cobre sulfato de cobre en contacto con la tierra - Fuente: NACE International cathodic protection technician**

Una medida de potencial tomada con cualquier electrodo de referencia puede ser convertida respecto a otro electrodo de referencia según se observa en la siguiente tabla de valores relativos:

Electrodo (Hemi-Pila)*	Potencial (voltios)
Hidrógeno Standard	0.000
Cobre-Sulfato de Cobre (CSE)	+0.316
Plata-Cloruro de Plata (SSC)	+0.256
Calomel Saturado (SCE)	+0.241
Zinc (ZRE)	-0.800

**Tabla 2 – Valores relativos de electrodos de referencia respecto del electrodo de Hidrogeno - Fuente:  
NACE International cathodic protection technician**

Todos los criterios definidos en el Standard de NACE RP0169 para acero y fundición de hierro se desarrollaron a través de experimentos y pruebas de laboratorio o se determinaron empíricamente a partir de datos evaluados provenientes de sistemas de protección catódica que operan satisfactoriamente.

«**Un potencial negativo (catódico) de al menos 850mV** con la corriente de protección catódica aplicada. Este potencial se mide contra un electrodo de cobre-sulfato de cobre saturado en contacto con el electrolito.

**Un potencial polarizado negativo de al menos 850mV** con respecto a un electrodo de referencia de cobre-sulfato de cobre saturado (potencial denominado Instant Off).

**Un mínimo de 100mV de polarización catódica** entre la superficie de la estructura y un electrodo de referencia estable en contacto con el electrolito.»  
[6].

## Normativa aplicable en la República Argentina

En Argentina las distribuidoras y transportadoras de gas se rigen por los lineamientos establecidos en la norma N.A.G.-100 "Normas mínimas de seguridad para el transporte y distribución de gas natural y otros gases por cañerías". En la parte I de esta norma se encuentran los requisitos para el control de la corrosión. La misma hace referencia a los criterios mencionados anteriormente en la RP0169 de NACE y al siguiente material de referencia:

- Norma GE-N1-108-1984 actualmente reemplazada por la NAG-108-2009: "Revestimientos anticorrosivos de cañerías y accesorios"
- Libro de mano de protección catódica de Schutzes W.V. Baeckmann y W. Schwenk

## Normativa internacional de otras asociaciones

En el mundo existen varias asociaciones con normativa referida a la protección catódica de estructuras enterradas y/o sumergidas.

### **International Standard ISO 15589-1: Petróleo y gas natural – Protección catódica de tuberías de transporte:**

Tiene la particularidad de modificar los criterios de protección catódica en función de la resistividad del suelo. Para los suelos de alta resistividad requiere:

-750mV<sub>CSE</sub> para resistividades  $100 \Omega\text{-m} < \rho < 1000 \Omega\text{-m}$

-650mV<sub>CSE</sub> para resistividades  $>1000 \Omega\text{-m}$

### **American Water Works Association (AWWA)**

Norma D104-97 "Protección catódica por corriente impresa controlada en forma automática para el interior de tanques de agua de acero" este standard especifica un criterio de -850mV a -1050mV de potencial polarizado con respecto a un electrodo de referencia de cobre-sulfato de cobre.

### **American Petroleum Institute (API)**

Norma API 651 "Protección catódica de tanques de almacenamiento de petróleo a nivel" Hace referencia a la RP0169 de NACE para protección catódica externa.

### **Petroleum Development of Oman (PDO-65-12)**

Un mínimo de -850mV instant-off con respecto al CSE. Evitar potenciales más negativos que -1200mV CSE (off).

### **Canadá**

CSA Z662-2015 "Sistemas de cañerías de Gas y Petróleo". Los criterios son los mismos que los de la práctica recomendada de NACE, con excepción de una condición cuando se aplica el criterio de 100mV.

### **Australia Standard Institute**

La norma AS 2832-2015 está compuesta de tres partes, la parte 1 se refiere a caños, cables y ductos, la parte 2 a estructuras enterradas y la parte 3 a estructuras sumergidas fijas. Los criterios son los mismos que los de la RP0169 de NACE.

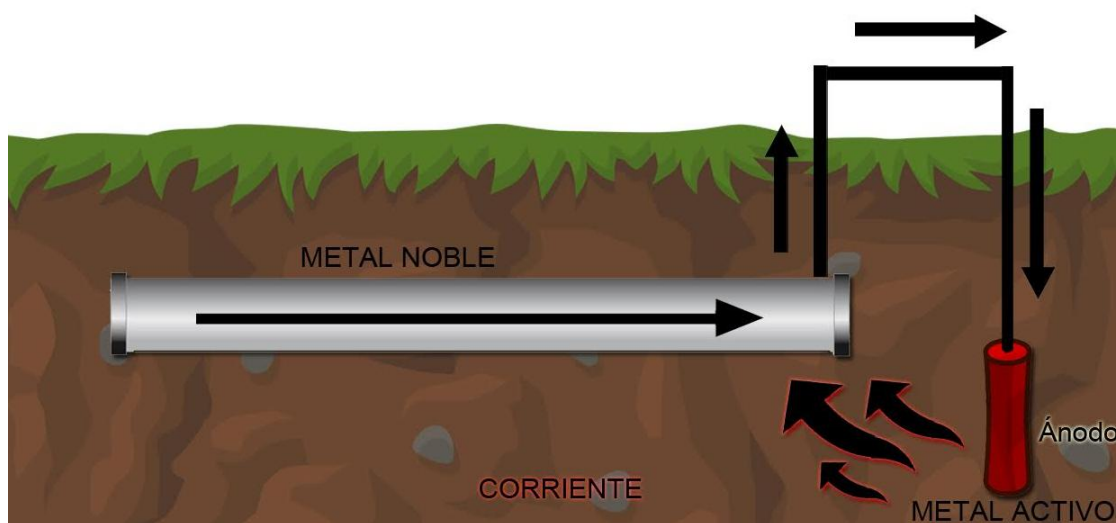
Como se puede observar hay variedad de normas disponibles alrededor del mundo. La mayoría se basa en los criterios establecidos por NACE en la RP0169 utilizados actualmente en la República Argentina.

## Sistemas de protección catódica

Cuando se inicia con el proceso de diseño de un sistema de protección catódica es necesario determinar qué tipo de instalación es la que necesita la estructura a proteger. Existen dos sistemas posibles de protección:

- Galvánico
- Corriente Impresa

El sistema Galvánico funciona bajo el principio de que un metal más activo conectado a un material menos activo formará una celda de corrosión galvánica. La aleación más activa sufrirá la corrosión para proteger al otro metal. Es por eso que se los conoce como ánodos de sacrificio.



**Ilustración 7 – Protección catódica por ánodos galvánicos - Fuente: Elaboración propia en base a NACE International cathodic protection technician**

Habitualmente los ánodos más utilizados son los de magnesio, aluminio y zinc en aleaciones para permitir que estos permanezcan activos y extender su vida útil.

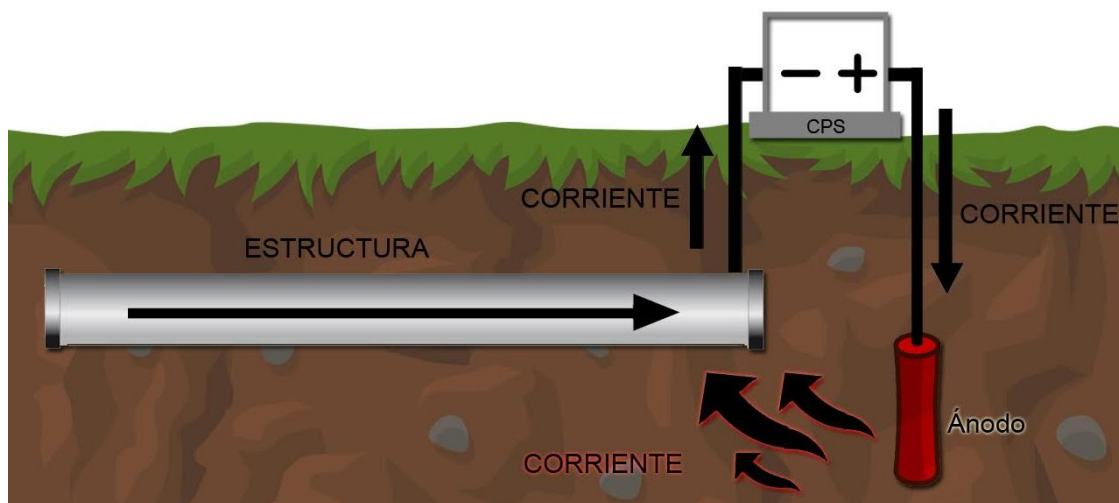
Los ánodos de magnesio pueden adquirirse en dos configuraciones, una aleación de alto potencial, aproximadamente -1750 mV referido al electrodo de cobre sulfato de cobre, logrando suministrar una mayor fuerza impulsora. Y la aleación estándar con una fuerza

impulsora de -1550 mV con respecto al electrodo de cobre-sulfato de cobre recomendado para suelos con bajas resistividades y agua.

Al igual que los ánodos de magnesio, los de zinc también se pueden encontrar con 2 tipos de aleaciones disponibles, una específica para utilizar en suelos y otra para utilizar en agua salada. Los ánodos de aluminio son producidos en variedad de aleaciones y se usan principalmente en aplicaciones marinas.

Los ánodos galvánicos se fabrican en variedad de formas y tamaños para distintas aplicaciones específicas. Se pueden solicitar en forma y tamaño a medida para todo tipo de propósitos. Se utilizan para múltiples propósitos.

Los sistemas de protección catódica por corriente impresa se diferencian de los galvánicos por poseer un equipo rectificador proveedor de energía y por utilizar otro tipo de ánodos que los sistemas galvánicos. Estos sistemas son utilizados en instalaciones que tienen altos niveles de requerimiento de corriente, en estructuras marítimas y pueden ser utilizados en electrolitos de cualquier resistividad. Los ánodos utilizados son de aleaciones que se consumen lentamente ya que estos sistemas funcionan a niveles más altos de voltaje y corriente que los sistemas de ánodos galvánicos. [5]



**Ilustración 8 – Protección catódica por corriente impresa - Fuente: Elaboración propia en base a NACE International cathodic protection technician**

## Diseño básico de un sistema de protección catódica

Siguiendo las recomendaciones NACE y a fin de ejemplificar de que manera influye la resistividad en las instalaciones de protección catódica, se detalla a continuación un ejemplo

básico de un sistema de protección catódica por ánodos galvánicos, establecido en el manual NACE CP3 (Técnico superior en protección catódica) [7].

Suponga que desea diseñar un sistema de protección por ánodos galvánicos para la protección de una tubería de 30 cm de diámetro y 6 Km de longitud recubierta con Epoxi Fundido (FBE).

- Resistividad del suelo es 5500  $\Omega$ -cm
- Profundidad de instalación de los ánodos 1.2 m
- $I_{cp}$  requerida es 30  $\mu A/m^2$
- La cañería se encuentra aislada en varios extremos
- La resistencia específica del recubrimiento es de 104  $\Omega$ -m<sup>2</sup>
- Vida útil mínima 15 años
- Diámetro Externo de la tubería 32,4 cm

**Paso 1:** Calcular la corriente total requerida ( $I_{cpt}$ )

$$I_{cpt} = I_{cp} \cdot A_t$$

$$I_{cpt} = I_{cp} \cdot \pi \cdot \varnothing d \cdot L$$

$$I_{cpt} = 30 \frac{10^{-6} A}{m^2} \pi \cdot 0,324 \cdot 6000 m$$

$$I_{cpt} = 183 mA$$

Dónde:

$I_{cpt}$ : Corriente total requerida

$I_{cp}$ : Corriente requerida por unidad de superficie

$A_t$ : Superficie total del ducto

$\varnothing d$ : Diámetro del ducto

L: Longitud del ducto

**Paso 2:** En este paso se debe seleccionar el tipo de ánodo a utilizar y determinar a qué profundidad será instalado. Dependiendo de la profundidad a la que sea instalado variará la resistividad del terreno.

Se debe calcular la resistencia del ánodo:

$$R_{a,h} = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{2L}{\varnothing a} \right)$$

Dónde:

$R_{a,h}$ : Resistencia de puesta a tierra del ánodo

L: Longitud del ánodo

$\varnothing_a$ : Diámetro del ánodo

L: Longitud del ducto

Los datos correspondientes al ánodo salen de especificaciones técnicas del fabricante.

$$R_{a,h} = \frac{5500 \Omega - \text{cm}}{2 \cdot \pi \cdot 76,2 \text{cm}} \left( \ln \frac{2 \cdot 76,2 \text{cm}}{15,2 \text{cm}} \right)$$

$$R_{a,h} = 26,5 \Omega$$

Acá se puede observar como la variación de la resistividad del terreno influye directamente sobre la resistencia de puesta a tierra del ánodo. Esta resistencia de puesta a tierra del ánodo es indispensable para determinar la corriente de salida del mismo. A partir de la corriente de salida se puede determinar la cantidad de ánodos necesarios a instalar para cubrir la corriente total requerida.

**Paso 3:** Calcular la corriente de salida del ánodo

$$I_a = \frac{E_{p,a} - E_{p,s}}{R_{a,h} + R_p}$$

Dónde:

$E_{p,a}$ : Potencial del ánodo seleccionado (Alto potencial - #17D3)

$E_{p,s}$ : Potencial de polarización deseado (-0.85 V según criterio NACE RP0169)

$R_{a,h}$ : Resistencia de puesta a tierra del ánodo

$R_p$ : Resistencia de la cañería (Acero + Recubrimiento)

Calcular la resistencia de la cañería:

$$R_p = \frac{r'}{At} = \frac{\text{Resistencia específica del recubrimiento}}{\text{area total de la cañería}}$$

$$R_p = \frac{r'}{At} = \frac{10^4 \Omega m^2}{\pi \cdot 0,324 m \cdot 6000 m} = 1.64 \Omega$$



Calcular la corriente de salida de un ánodo:

$$I_a = \frac{-0,850V - (-1,7V)}{26,5\Omega + 1.64\Omega} = 30\text{mA}$$

Calcular la cantidad necesaria de ánodos en función de la necesidad de corriente:

$$N = \frac{I_{cp}}{I_a} = \frac{183\text{mA}}{30\text{mA}} = 6.1 \rightarrow 7 \text{ ánodos}$$

Luego es necesario poder determinar la vida útil que tendrá la instalación dimensionada, ya que a medida que los ánodos se agotan, llega un momento donde no le es posible entregar la corriente mínima requerida, aún incluso cuando no se haya consumido completamente. Es por este motivo que en los cálculos de vida útil se considera un factor de utilización "U", generalmente de 0,5 a 0,9 dependiendo del tipo de instalación y las condiciones de funcionamiento. La velocidad de consumo y la capacidad anódica real son siempre inferiores a los valores teóricos calculados mediante ley de Faraday, por lo tanto suele aplicarse una estimación de la eficiencia para cada material anódico basándose en la experiencia [7].

Calculo de la vida útil del ánodo en función de la densidad de corriente:

$$L = \frac{W \cdot U \cdot E \cdot Ca}{I_a}$$

Dónde:

W: Peso (Kg) del ánodo a utilizar

U: Factor de utilización (0,85)

E: Eficiencia (100%)

Ia: Corriente (A)

Ca: Capacidad real (A-año/Kg) basada en la densidad de corriente del ánodo

Para conocer la capacidad real del ánodo se debe calcular la densidad de corriente del mismo,

$$i_a = \frac{I_a}{A_a}$$

Dónde:

Aa: Área superficial del ánodo. Suponga un área superficial de 2,6 ft<sup>2</sup>

Ia: Corriente (mA)

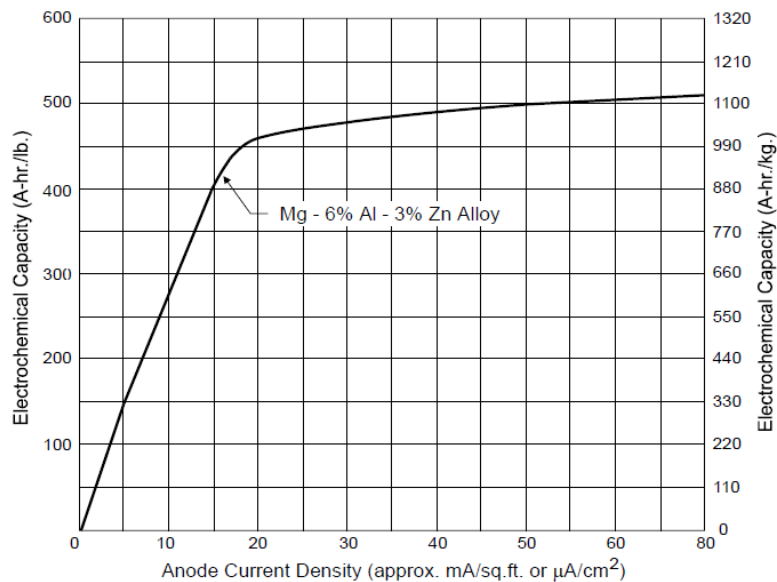
$$i_a = \frac{30\text{mA}}{2,6\text{ft}^2} = 11.5 \text{ mA/ft}^2$$

Para determinar la capacidad del magnesio se ingresa en la Ilustración 9 con la densidad de corriente calculada 11.5 mA/ft<sup>2</sup>

$$Ca = 300 A \frac{hr}{lb} = 0.034 A \frac{año}{lb} = 0.07495 A \frac{año}{Kg}$$

Finalmente se calcula la vida útil del sistema:

$$L = \frac{8Kg \cdot 0,85 \cdot 1 \cdot (0.07495 A - \frac{año}{Kg})}{0,030A} = 16,98 \text{ años}$$



**Ilustración 9 - Capacidad de Corriente para la Aleación de Magnesio AZ63 vs. Densidad de la Corriente - Fuente: R. A. Gummow [8]**

Se puede observar durante el diseño de un sistema de protección catódica básico cómo influye el valor de la resistividad en la cantidad de material galvánico a instalar. Esto se ve reflejado directamente en los costos de instalación y mantenimiento de los sistemas de protección catódica. Existen diversos estudios plasmados en el Manual de NACE CP3 (Técnico superior en protección catódica) que determinan que al disminuir el pH aumentará la densidad de corriente de intercambio y repercutirá desplazando el potencial de equilibrio de los cátodos de la estructura en la dirección más noble. Por tal motivo, es sumamente importante conocer la zona donde se encuentra ubicada la instalación a proteger y contar, con anterioridad, con determinados datos del suelo beneficiaria al rubro considerablemente [7].

## Resistividad del suelo

La resistividad del suelo es la propiedad que tiene éste de conducir electricidad. Es conocida como la resistencia específica del terreno, varía ampliamente a lo largo y ancho del globo terrestre y según la ley de Archie modificada [9] la resistividad del suelo depende de parámetros como la tortuosidad, cementación, textura, resistividad aparente del agua con sales disueltas que ocupan parcialmente los poros y la temperatura.

Existen diversos métodos para realizar la medición de resistividad del terreno, los métodos eléctricos tienen su fundamento en el hecho de que las variaciones en la conductividad del suelo alteran el flujo de corriente en el interior de la tierra. Usualmente la corriente penetra en el terreno a través de electrodos y se mide la caída de potencial entre ellos. Para medirla se inyecta una determinada intensidad de corriente y, en función de la caída de potencial y de la distancia entre electrodos, se puede determinar el valor de una nueva magnitud: la resistividad específica del terreno.

«Si el suelo es homogéneo, el valor así obtenido coincide con la resistividad verdadera, pero, de no ser así -suelo homogéneo, como sucede generalmente- el valor obtenido depende de las resistividades de las distintas formaciones que atraviesa la corriente» [10].

Realizar un estudio de las resistividades del suelo, a distintas profundidades y en diferentes locaciones, permite conocer la geomorfología del suelo obteniendo interesantes conclusiones.

La conducción eléctrica en suelos rocosos es principalmente electrolítica ya que las rocas -sus granos- son aislantes en sí, por lo que la conducción eléctrica se realiza a través del agua intersticial que normalmente contienen y que siempre tiene sales disueltas en mayor o menor grado que la hacen conductora. Por consiguiente, la resistividad de una formación será función de su contenido en electrolitos, que a su vez depende de la porosidad efectiva de la roca y del índice de saturación.

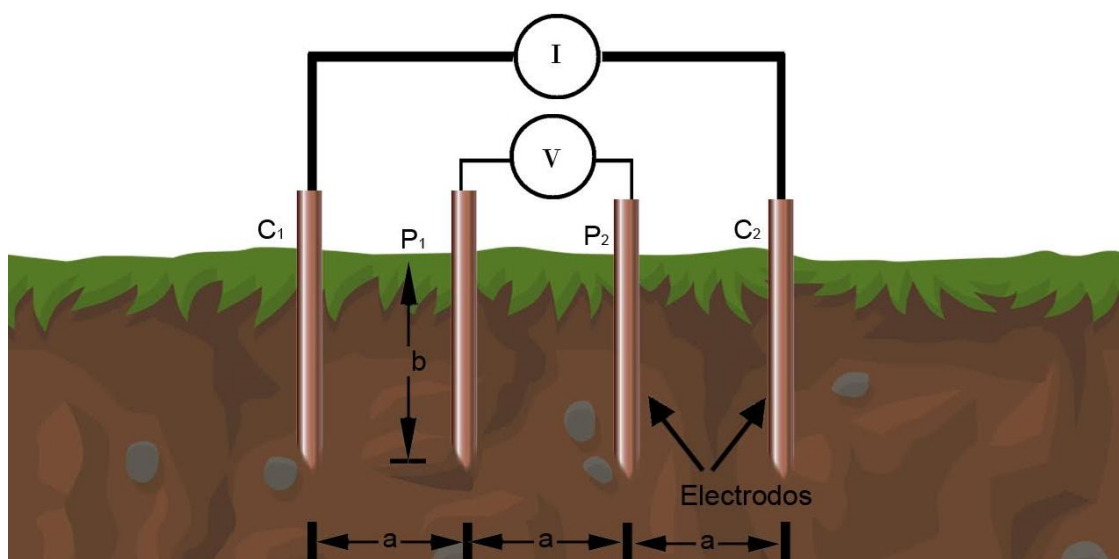
Hay que señalar que la resistividad de cualquier formación varía entre amplios límites, no solo de una locación a otra, sino que se pueden observar variaciones dentro de zonas cercanas, principalmente cuando se trata de formaciones superficiales no consolidadas. No existe una ley general que correlacione litología con resistividad. No obstante, pueden establecerse criterios de tipo general [10].

Existen distintos métodos eléctricos para medir la resistividad del terreno, uno de ellos es el método de Schlumberger que es utilizado para mediciones a grandes profundidades y el método de Wenner, el cual fue utilizado en esta investigación.

## Método de Wenner

En el año 1915, el Dr. Frank Wenner del U.S. Bureau of Standards desarrolló una teoría que permite conocer la resistividad aparente del terreno. Este método es conocido como el método de Wenner, el cual consta de 4 electrodos que se insertan en el suelo, ubicados en línea recta, a una misma profundidad y los valores obtenidos dependerán directamente de la distancia de separación entre electrodos y de la resistividad del terreno. Cabe destacar que no depende en forma apreciable del material y tamaño de los electrodos utilizados pero sí del tipo de contacto que hagan con el terreno.

«El principio básico de este método es la inyección de una corriente directa o de baja frecuencia a través de la tierra entre dos electrodos C1 y C2 mientras que el potencial que aparece se mide entre dos electrodos P1 y P2. Estos electrodos están enterrados en línea recta y a igual separación entre ellos. La razón  $V/I$  es conocida como la resistencia aparente. La resistividad aparente del terreno es una función de esta resistencia y de la distancia de los electrodos» [11].



**Ilustración 10 – Medición de resistividad por el método de las 4 puntas de Wenner – Fuente: Elaboración propia**

En la Ilustración 10 se puede observar como los electrodos (jabalinas) son ubicados en línea recta. A través de los electrodos exteriores se inyecta la corriente anteriormente mencionada y se realiza la medición de potencial a través de los electrodos interiores. Finalmente la resistividad aparente se puede definir con la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{4. \pi. a. R}{1 + \left[ \frac{2. a}{(a^2 + 4. b^2)^{0.5}} \right] - \left[ \frac{2. a}{(4. a^2 + 4. b^2)^{0.5}} \right]}$$

Dónde:

$\rho$ : Resistividad promedio a la profundidad A

a: Distancia de separación entre los electrodos

b: Profundidad de enterrado de los electrodos

R: Lectura en Ohms [ $\Omega$ ] del resistivímetro

Si la distancia enterrada de los electrodos (b) es inferior que la distancia de separación entre electrodos manteniendo la relación  $a > 20b$ , se puede aplicar la siguiente fórmula simplificada:

$$\rho = 2. \pi. a. R$$

El valor de resistividad obtenido a través de la realización del cálculo anteriormente mencionado va a representar la resistividad promedio de un hemisferio del terreno de un radio igual a la separación entre los electrodos.

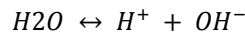
Siempre es recomendable no tomar lecturas paralelas a estructuras metálicas enterradas para que no se vean afectadas, y obtener mejores resultados.

Las mediciones fueron realizadas según los estándares propuestos por ASTM, siguiendo la norma ASTM-G57-2012 "Standard test method for field measurement of soil resistivity using the Wenner four-electrode method"

## pH

«El pH del suelo es una de las propiedades químicas más relevantes ya que controla la movilidad de iones, la precipitación y disolución de minerales, las reacciones redox, el intercambio iónico, la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes» [12].

Para que se forme una celda de corrosión es necesario contar con un electrolito (medio conductor) a través del cual las cargas circularan mediante el desplazamiento de iones. El agua es un electrolito que puede funcionar como un medio conductor; sin embargo, el agua pura no es muy conductora debido a la baja presencia de iones contaminantes (resistividad del agua destilada  $> 1.000.000 \Omega/\text{cm}$ ), para que haya iones que puedan conducir las cargas, el agua debe disociarse (ionizarse) en cierta medida. La ionización del agua puede representarse así:



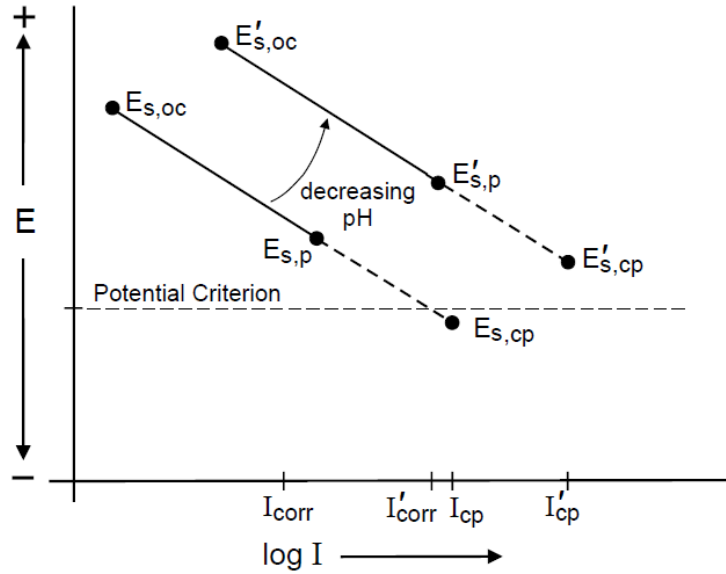
«La ionización del agua es una reacción reversible que con el transcurso del tiempo alcanza un equilibrio dinámico en que la velocidad de disociación del agua es igual a la velocidad de recombinación de los iones» [7].

El pH es definido como el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno. El pH del agua pura a 25° C es 7, considerado pH neutro, donde la cantidad de iones hidrógeno es exactamente igual a la cantidad de oxhidrilos.

$$pH = -\log[H^+] = \log\left[\frac{1}{H^+}\right]$$

«Los iones hidrógeno son reactivos catódicos. Por lo tanto, la disminución del pH hará que aumente la densidad de corriente de intercambio y resultará en un desplazamiento del potencial de equilibrio de los cátodos de la estructura en la dirección más noble. La disminución del pH aumenta la corriente de protección catódica requerida» [7].

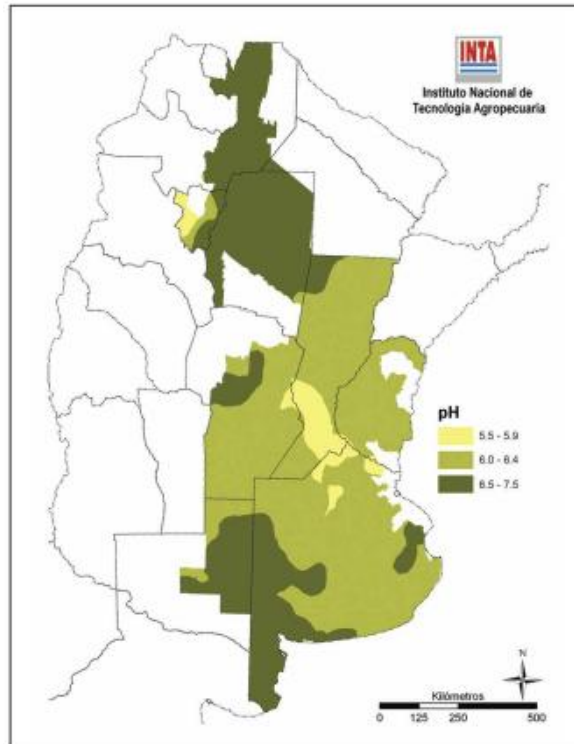
En la Ilustración 11 se puede observar esta variación visualizándose el efecto de la disminución del pH.



**Ilustración 11 – Efecto de la disminución del pH - Fuente: NACE International cathodic protection technologist [7]**

Actualmente en la provincia de Buenos Aires existen miles de kilómetros de cañerías enterradas que necesitan mantenimiento y monitoreo constante y muchas otras por proyectar. Por tal motivo es sumamente importante conocer las condiciones del suelo para poder tomar mejores decisiones.

Actualmente existe disponible un mapa de pH realizado por Sainz H., Echeverria H. y Angelini H. en colaboración con la unidad Integrada Balcarce: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria en adelante (INTA) y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) con mediciones en el período 2004-2006. Considerando que Buenos Aires es una provincia donde se desarrolla la actividad agrícola, según Liebig M. A. [13], se debe tener en cuenta los efectos que puede generar la frecuente aplicación de algunos fertilizantes los cuales pueden contribuir a la disminución del pH del suelo.



**Ilustración 12 - Rango de valores de mediana de pH del horizonte superficial (0-20cm de profundidad) de suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana. Interpolación realizada con el método Kriging. Fuente: Informaciones Agronómicas N°2 IPNI (International Plant Nutrition Institute)**

## El suelo

En Argentina el suelo ha sido estudiado formalmente desde comienzo de 1944 enfocándose en la agricultura ya que es un factor fundamental para el aprovechamiento de las tierras. Luego de haber sido creado el INTA, en el año 1956 se comenzó a realizar relevamiento de los suelos con métodos más modernos y, se publicó el primer mapa esquemático de las regiones de suelos de Argentina en 1960.

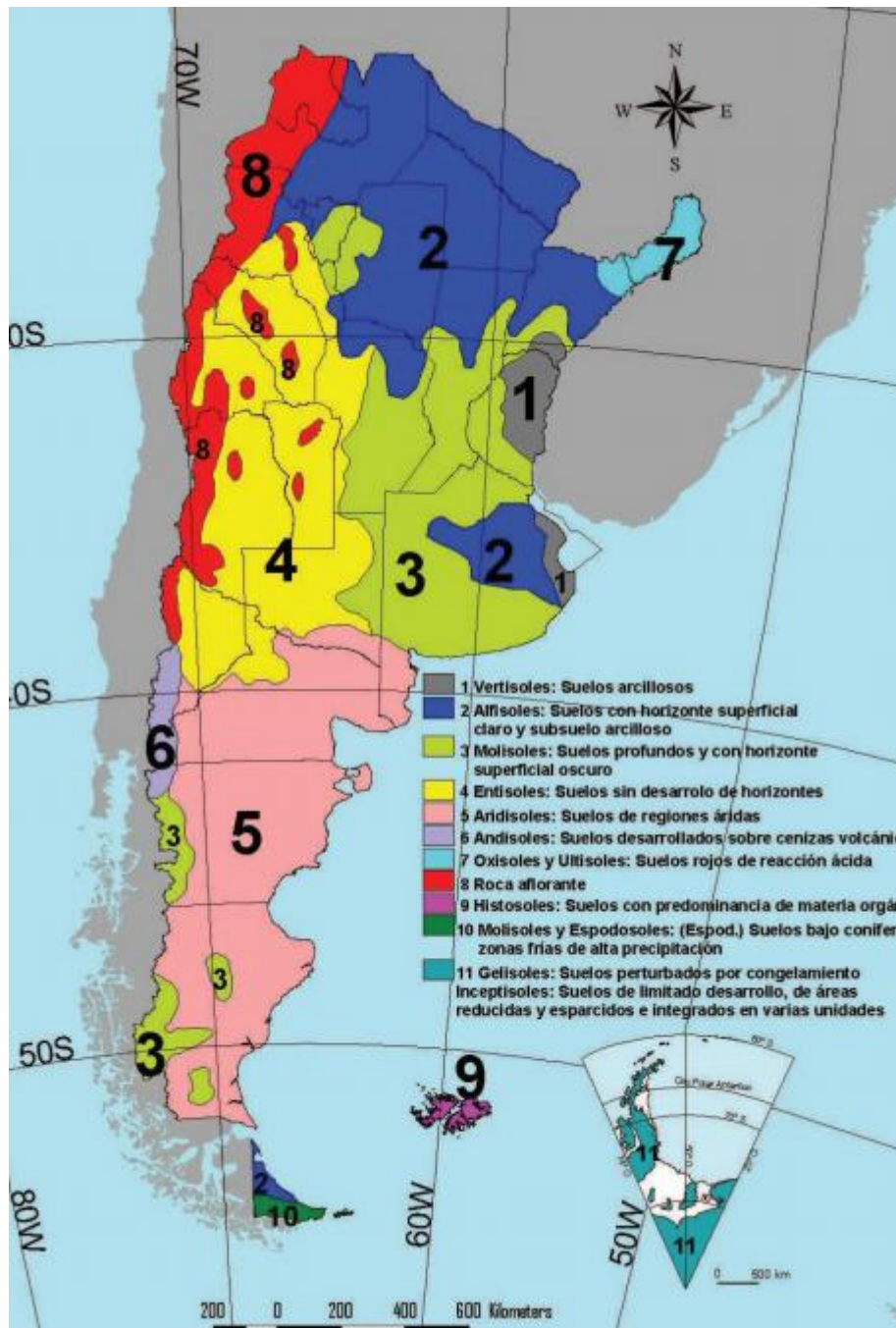
En la década del 70 este trabajo se continuó y se logró publicar las primeras cartas de suelos de la República Argentina, las cuales se elaboraron en escala 1:50.000 a partir de relevamientos aerofotográficos a lo largo del territorio nacional. Estas brindan información sobre el clima, la vegetación, ubicación geográfica, el uso de la tierra, análisis de la textura, y su composición química [14].

El suelo es un cuerpo natural y dinámico que desempeña muchos roles claves en los ecosistemas terrestres [15] y se forma a partir del material parental, el relieve, la biota, el clima y el tiempo, en una serie de procesos globales: ganancias, pérdidas, traslocaciones y transformaciones, que determinan sus características [16]. La acción combinada de factores y procesos formadores conlleva al desarrollo de gran diversidad de suelos [17].



En cuanto a los suelos de la Provincia de Buenos Aires, es posible mencionar cinco, según la clasificación "Soil Taxonomy" (taxonomía de suelos): Molisoles, Alfisoles, Entisoles, Ardisoles y Vertisoles [18].

- Molisoles: suelos negros o pardos que se desarrollaron a partir de sedimentos minerales en climas templado húmedo a semiárido, pero también, pueden presentarse en regímenes fríos y cálidos, con una vegetación mayormente conformada por gramíneas.
- Alfisoles: poseen un enriquecimiento secundario de arcillas, desarrollado en condiciones de acidez o alcalinidad sódica, generalmente pobre en materia orgánica, de poco espesor, presentando alta saturación.
- Entisoles: incluyen los suelos que no evidencian o tienen escaso desarrollo de horizontes pedogénéticos.
- Ardisoles: son suelos de climas áridos, ya sean fríos o cálidos, dado que no disponen durante largos períodos de agua suficiente para el crecimiento de cultivos o pasturas prolíficas
- Vertisoles: son suelos muy ricos en arcillas expandibles, por lo que se agrietan fuertemente durante la estación seca, la mayoría de los años.



**Ilustración 13 - Órdenes de suelos - Fuente: Cruzate y Moscatelli, 2009**

La Provincia de Buenos Aires, dispone de una gran cantidad de lagunas, dentro de las cuales, las más comunes miden entre 0,05 y 10 ha. En su mayoría, se deben a la erosión eólica de la llanura pampeana, y las, menos a fallas tectónicas.

Además, muchos ríos tienen parte de su recorrido en dicha provincia: río Paraná, Río de la Plata y los ríos Colorado y Negro, manteniendo de este modo las principales cuencas fluviales argentinas.

Por otra parte, el río Salado, tiene su cauce en jurisdicción bonaerense, aunque sus fuentes se encuentren en el extremo sur de la provincia de Santa Fe.

La cuenca del río Salado posee otros dependientes importantes tales como el Vallimanca, el Tapalqué y el las Flores, todos procedentes de las sierras bajas del centrosur [19].

El río Salado bonaerense es por su parte tributario del Río de la Plata, dispone además de pequeñas sub cuencas del Río de La Plata, como las del Arroyo Medio, Baradero, Luján, Reconquista o Matanza [20].

Como se puede observar, las cartas de suelo y todos los estudios afines fueron pensados principalmente para los productores, con el objetivo de lograr aprovechar y administrar sus tierras de modo más eficiente. A su vez se ven beneficiados los ingenieros agrónomos, pudiendo utilizarlas en tareas de divulgación y asesoramiento, los ingenieros civiles, pueden aprovecharlas para conocer las propiedades de los suelos al momento de realizar la ingeniería de sus proyectos, y los científicos, para sus trabajos de investigación. Actualmente no se ha desarrollado una carta que considere la resistividad del terreno la cual le sería de mucha ayuda para todos los ingenieros que combaten contra la corrosión en su labor diaria.

## Variabilidad del suelo

La mejor forma de estudiar la variabilidad del suelo es a través de la utilización de técnicas de geoestadística. Estas herramientas logran representar datos que pueden ser volcados en mapas para observar detalladamente como interactúan todas las muestras recolectadas dentro de un área determinada, buscando asociaciones y relaciones entre las mismas [21].

En la actualidad es necesario lograr una mejora en la exactitud de la interpretación de las muestras recolectadas en campo. Y por tal motivo deja de ser factible la utilización de la fotointerpretación, ya que muchos de los cambios del suelo no se evidencian con una simple observación externa. Es aquí donde entran en juego distintos tipos de análisis geoestadísticos, que utilizan el semivariograma y métodos de interpolación para obtener mapas isoritmicos de las características analizadas [22].

La variabilidad del suelo depende principalmente del tipo de propiedad que se esté siendo analizada. Existiendo habitualmente más variación en las propiedades químicas que las físicas [23]. Cuando las zonas se encuentran urbanizadas aumenta el nivel de variación debido a los movimientos y contaminación que se va dando paulatinamente en los suelos. En cambio. en zonas rurales la variabilidad se debe a factores naturales y antropogénicos [24].

La actividad humana promueve la variabilidad a través de la distribución de residuos recientes y en el pasado lejano afectando la acumulación de materia orgánica con todas sus

implicaciones. Son factores importantes en la variabilidad antropogénica la distribución de fertilizantes, la diferente remoción de nutrientes causada por diferentes tipos de cultivos y rotaciones, el efecto significativo de la erosión, labores culturales, nivelaciones de terrenos y compactación [24].

Además de los factores citados, se debe considerar la variación en función del clima. En especial la cantidad, frecuencia e intensidad de precipitaciones, vientos, temperatura máxima, mínima, amplitud diurna y nocturna, así como la radiación solar [25].

La gran constante en relación a los suelos es su variabilidad, pudiendo ser esta: vertical u horizontal. La primera se refiere a las diferencias entre los horizontes y, la segunda a como los suelos varían de un lugar a otro [25].

En las variaciones a gran escala, los patrones del suelo son principalmente resultado del clima y vegetación y secundariamente debidas a las diferencias de material parental. Aunque a menudo es útil referirse a las características regionales generales del suelo, es importante recordar que existen muchas variaciones al interior de cada grupo regional [26].

## Sistemas de Información Geográfica

La utilidad principal de un Sistema de Información Geográfica radica en su capacidad para construir modelos o representaciones del mundo real, a partir de las bases de datos digitales. Esos modelos se los puede utilizar en la simulación de los efectos que un proceso de la naturaleza o una acción antrópica produce sobre un determinado escenario en una época específica [27].

Al inicio, esta herramienta se utilizó para manejar la información de análisis de suelo, para desarrollar mapas de dosis variables de fertilización y aplicación de cal agrícola.

Luego, se usó SIG para manejar estudios más generales del suelo, datos de producción y otra información de manejo y administración agrícola. Sin embargo, el poder del GIS va más allá del desarrollo de mapas que muestran la variabilidad del suelo o del rendimiento.

## Geoestadística

Continuando con lo recopilado por José Rafael Vasquez Polo de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, diversos métodos han sido utilizados para describir los cambios del suelo, entre ellos se encuentran los considerados en los procesos rutinarios de clasificación e

inventario de suelos, hasta métodos cuantitativos considerando análisis estadístico y geoestadístico [28].

El enfoque estadístico convencional describe la variabilidad de parámetros a través de observaciones de una propiedad dada; estas observaciones son estadísticamente independientes de su posición inicial, es decir, considera la magnitud de estos como si los puntos en que se realizan las observaciones estuvieran ubicados completamente al azar. Puesto que el enfoque estadístico convencional no considera la estructura espacial de las propiedades del suelo, es necesario utilizar un enfoque más real que incorpore descripciones estadísticas de la estructura espacial de los parámetros del suelo. Por tal razón, la estadística simple se considera como un método no apropiado, debido a que no toma en cuenta la dependencia espacial presente en la mayoría de las propiedades de los suelos, por lo cual se hace necesario la utilización de herramientas estadísticas adicionales. Una herramienta útil en los estudios de variabilidad es la geoestadística. Su origen se remonta a la industria minera, fundamentalmente en Sudáfrica, a principios de siglo XVIII y está referida al estudio de la distribución en el espacio de variables geológicamente importantes, con fines de explotación. A partir de 1951, comienza el desarrollo empírico de la geoestadística con los trabajos de Sichel y Krige en 1960 luego G. Matheron retomó los trabajos de Krige, desarrollando el fundamento teórico de la geoestadística. [29]

La Geoestadística es una rama de la estadística que se basa en la teoría de las variables regionalizadas y brinda herramientas cuantitativas para su discusión y estimación [30]. Con ella pueden estudiarse los cambios graduales del suelo dentro de cada delineación y también es posible estimar los atributos de suelo en sitios no muestreados. Además es una técnica capaz de examinar la estructura espacial de las propiedades del suelo [31] y contribuye a la comprensión de los efectos espaciales de los factores formadores y procesos genéticos.

A escala experimental, el suelo se ha considerado por la estadística Fisheriana como un factor no controlado y cualquier variación se piensa que se puede manejar por la aleatorización de las muestras ignorando su localización. Esta concepción de la variabilidad no ha permitido una evaluación precisa; esto ha influido en parte en que a nivel experimental el suelo ha sido considerado como un factor no controlado, y cualquier posible variación se piensa que puede ser manejada por el proceso de aleatorización de los tratamientos.

Consecuentemente, se supone a la unidad experimental como homogénea quedando, en el mejor de los casos, el efecto diferencial del suelo enmascarado dentro del error experimental. Con el análisis de la variable regionalizada [32], las muestras no se colectan al azar; con ello se puede obtener estructura espacial de la varianza e información útil acerca del número de muestras, la época, el lugar, el dominio de cada muestra y la utilidad de una muestra en relación con un modelo conceptual y su utilidad en relación con la muestra.

Generalmente, cuando se estudia la variabilidad espacial de una propiedad del suelo, es conveniente utilizar la teoría de variables regionalizada [33]. Una variable regionalizada no es más que una función dependiente del espacio, que toma valor por cada punto y está caracterizada por localización, es decir, ella ocurre en un espacio, denominado soporte geométrico; caracterizado por una forma, tamaño y dirección; continuidad y anisotropía, su comportamiento varía con la dirección [34]. Una variable regionalizada describe una variable que se encuentra en el espacio y que muestra cierta estructura.

De otra parte, en la geoestadística hay necesidad de conocer la localización relativa de las muestras en el espacio o en el tiempo, a partir de lo cual se puede calcular la estructura de la varianza, la cual expresa la dependencia entre las medidas a través de autocorrelogramas y semivariogramas.

La semivarianza es una medida del grado de similitud que existe entre dos observaciones situadas a una determinada distancia; mientras más similares sean las observaciones menor será la semivarianza. La semivarianza no es más que la varianza de las diferencias entre pares de puntos separados por una distancia dada [35]. La función semivarianza se expresa en la siguiente ecuación:

$$Y_{(h)} = \frac{1}{2N} \sum_{i=0}^n (Z_{(x+h)} - Z_{(x)})^2$$

Dónde:

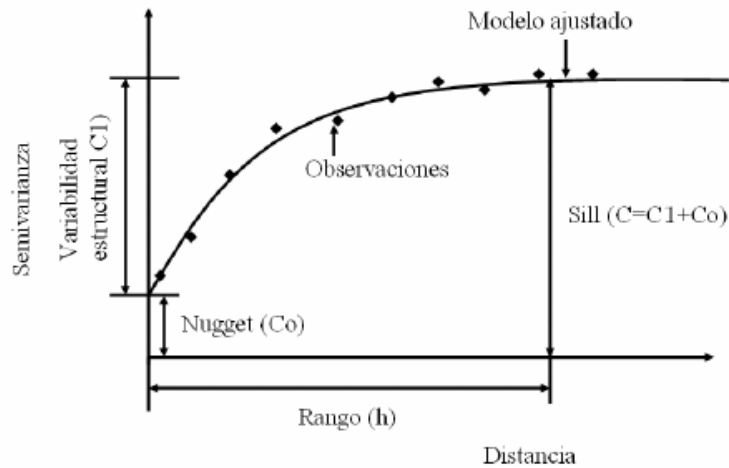
$Y_{(h)}$ : Semivarianza

N: Número de pares de valores de Z

$Z_{(x)}$ : Valor de la propiedad Z en el lugar x

$Z_{(x+h)}$ : Valor de la propiedad Z a una distancia h del lugar x

Un semivariograma es un gráfico que relaciona la distancia contra la semivarianza. Habitualmente esta semivarianza a medida que aumenta la distancia va aumentando hasta alcanzar un valor estable (still), y la distancia a la cual logra alcanzar el umbral se la conoce como amplitud o rango de dependencia espacial. Esto permite observar hasta donde hay dependencia espacial entre los datos recolectados. En teoría, la semivarianza debería ser nula cuando la distancia es cero (0), pero esto habitualmente no ocurre, a este fenómeno se denomina efecto nugget y es ocasionado primordialmente por una variación imposible de detectar a la escala de muestreo utilizada [36]. En la Ilustración 14, se presenta el esquema de un semivariograma.



**Ilustración 14- Esquema de un semivariograma - Fuente: Jaramillo, 2003 [36]**

Según Londoño L. [37], en línea general siempre se deben seguir los siguientes pasos a la hora de realizar un estudio geoestadístico:

- Análisis exploratorio de los datos
- Análisis estructural
- Interpolación o estimación espacial
- Validación del modelo Geoestadístico

### **Análisis exploratorio de los datos**

Cuando se inicia con un estudio del tipo geoestadístico, es necesario analizar los datos, poder determinar si existe algún tipo de tendencia que pueda ser evidenciada, y lograr describir cuantitativamente y cualitativamente la muestra recolectada. Si lo que se busca es analizar el comportamiento de una variable o la relación entre dos o más variables se debe realizar una descripción univariada o bivariada respectivamente.

Los pasos fundamentales para un análisis exploratorio son:

- Plasmear los valores recolectados en figuras y diagramas
- Identificar observaciones "sospechosas" o valores atípicos "outliers"
- Determinar qué puede estar causando estos valores atípicos
- Realizar el cálculo de estadísticos descriptivos
- Identificar las poblaciones que están bajo estudio.
- Determinar la distribución de la muestra

## **Análisis estructural**

Una vez finalizado el análisis exploratorio se debe comenzar a determinar si existe correlación entre las variables, teniendo presente el concepto de variable regionalizada. Una variable regionalizada puede ser comprendida como una variable aleatoria que tiene la particularidad de estar distribuida espacialmente [37].

Los pasos básicos para llevar adelante un análisis estructural son:

- Cuantificar la correlación espacial
- Confeccionar el semivariograma experimental
- Interpretación del semivariograma
- Ajustar el modelo teórico

## **Interpolación espacial**

A través de la interpolación se busca dar respuesta a datos desconocidos a partir de las mediciones efectuadas. Generalmente en la mayoría de los casos no es posible acceder a todos los datos necesarios para llevar adelante un estudio Geoestadístico, en consecuencia es menester desarrollar métodos confiables que desde el punto de vista estadístico permitan la estimación de más datos. Según Londoño L. [37] los modelos geoestadísticos deben ser validados, cruzando datos, utilizando distintos algoritmos de interpolación y buscando los semivariogramas que mejor describa la correlación espacial.

## **Método de Interpolación Kriging ordinario**

La relación entre la interpolación ponderada y la estructura cuantitativa de la variabilidad espacial de los valores de un parámetro fue presentada originalmente en 1966 por Krige, en la evaluación de vetas mineras y posteriormente extendido su uso a situaciones de suelos cultivados, principalmente por Webster y Burgues en 1980, Nielsen et al en 1983 y Vieira et al en 1982, todos ellos citados por Buitrago en 1995 y luego por Vasquez Polo en 2009. Los procesos geoestadísticos de interpolación utilizados son conocidos con los nombres de Kriging (interpolación simple) y Cokriging (interpolación compuesta). Con la información derivada de los semivariogramas ajustados (amplitud, umbral, varianza aleatoria), se pueden estimar valores en los sitios no muestreados utilizando el proceso de interpolación conocido como Kriging puntual, generándose diagramas de las estimaciones y errores asociados a la estimación.



El método Kriging es una técnica de interpolación que usa la dependencia espacial que existe entre las observaciones para estimar valores de una variable en lugares no muestreados, sin sesgo y con mínima varianza. Es un procedimiento semejante al de interpolación por media móvil ponderada, excepto que aquí los pesos son determinados a partir de un análisis espacial, basado en el semivariograma experimental [38]. El Kriging engloba un conjunto de métodos de estimación, incluyendo procedimientos estacionarios (Kriging simples y ordinarios), no estacionarios (Kriging universal, funciones intrínsecas de orden  $k$ ), univariados y multivariados (Co-Kriging, etc). Las formas simples de Kriging envuelven estimación de valores puntuales (Kriging puntual, siendo la técnica más utilizada en los trabajos de ciencia del suelo) o áreas (Kriging bloque) y asume que los datos muestreados son estacionarios y presentan distribución normal [30]. Co-Kriging es el procedimiento usado cuando una variable no puede ser suficientemente muestreada (dificultades experimentales, altos costos de muestreo, etc) para proveer una precisión aceptable en la estimación. La precisión en la estimación puede ser mejorada por la utilización de la correlación espacial entre la variable poco muestreada (primaria) y otra covariable más frecuentemente muestreada [30].

Los mapas isorítmicos basados en la interpolación ponderada Kriging se sitúan entre las técnicas de separación de unidades de suelo de relativa homogeneidad en relación con la variabilidad espacial de los valores de algún parámetro [29].

# Capítulo 3

## Marco empírico

### Diseño metodológico

A través esta investigación se lleva adelante un estudio geofísico de resistividad eléctrica del suelo y pH. El proyecto se desarrolla en la República Argentina, provincia de Buenos Aires a lo largo de toda su extensión. La misma tiene una superficie de 307.571 Km<sup>2</sup>. Para llevar adelante esta investigación se recorrieron más de 10.000 Km para efectuar las distintas mediciones. Esta investigación forma parte de un proyecto de desarrollo y transferencia entre la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Lomas de Zamora y una empresa aledaña líder en el rubro de la protección anticorrosiva.

### Objetivo general

Modelizar la variabilidad espacial de las propiedades eléctricas y químicas del suelo a diferentes profundidades para contribuir a generar nuevas herramientas que faciliten la toma de decisiones en el rubro de la protección catódica, disminuyendo la incertidumbre en los procesos de presupuestación de obras.

### Objetivos específicos

- Determinar en el ámbito de la provincia de Buenos Aires las propiedades eléctricas (resistividad a 1 y 2 metros de profundidad), químicas (pH a 20 cm de la superficie) y su distribución espacial.
- Identificar mediante la elaboración de mapas temáticos, la distribución espacial y caracterización de los atributos del suelo para resistividades a 1 y 2 metros de profundidad.
- Actualizar los mapas existentes de pH de la provincia de Buenos Aires.
- Contribuir a definir la geomorfología de la provincia de Buenos Aires.
- Establecer una metodología para el tratamiento de los datos.

## Variables

Resistividad: La resistividad del suelo es la propiedad que tiene éste para conducir electricidad. Es conocida además como la resistencia específica del terreno. En campo se midió la resistencia a través de la utilización de un resistivímetro y de la aplicación del método Wenner y su ecuación simplificada para obtener la resistividad en  $\Omega/\text{cm}$  medidas a 1 y 2 metros de profundidad.

pH: El pH del suelo es una de las propiedades químicas más relevantes ya que controla la movilidad de iones, la precipitación y disolución de minerales, las reacciones redox, el intercambio iónico, la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes. [12] El pH es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución, en este caso la superficie del terreno medido.

Geolocalización: Es la capacidad de obtener la ubicación geográfica real de cada una de las muestras que fueron posicionadas utilizando coordenadas geodésicas con precisión submétrica.

## Hipótesis de trabajo

*"El proceso de decisión sobre la instalación de distintos sistemas de protección catódica se ve influenciado por la resistividad del terreno (propiedades eléctricas), su profundidad, pH (propiedades químicas) y su ubicación geográfica."*

## Muestra

La caracterización del suelo se basa en una fracción del mismo que debe tener un alto grado de representatividad del total; por consiguiente el objetivo del muestreo es el de hacer inferencias sobre la población de interés, basado en la información contenida en la muestra. La confiabilidad de los resultados depende en gran parte de la representatividad de la muestra, de tal forma que se puedan hacer recomendaciones adecuadas con un determinado nivel de confianza [35].

El tipo de muestra recolectado es aleatorio por conglomerados o áreas. Las áreas fueron obtenidas a partir de la generación de una cuadrícula sobre la provincia de la Buenos Aires delimitada cada medio grado de latitud y longitud.

Consecuentemente con este principio la muestra por conglomerados o áreas consiste en seleccionar aleatoriamente un cierto número de conglomerados y en investigar después, todos los elementos pertenecientes a los mismos. Se tomaron muestras de resistividad y pH del suelo de la provincia de Buenos Aires en cada una de las áreas delimitadas. Las resistividades fueron medidas a 1 y 2 metros de profundidad a través del método de las 4 puntas de Wenner según la norma ASTM-G57-2012 y el pH utilizando un electrodo de antimonio. Para cada variable se obtuvieron 884 muestras. La ubicación en cada punto de muestreo fue realizada mediante un geoposicionador GPS Trimble PRO-XRT con sistema de corrección en tiempo real Omnistar XP, lo que permitió tener un error en la posición de la muestra menor a 30cm. Mediante el uso del GPS, al medir el rendimiento como al muestrear el suelo se puede determinar exactamente el sitio en el campo para poder regresar al mismo sitio cuando sea necesario. De esta forma es posible comparar los mapas de rendimiento y de suelo por ejemplo [39].

Las mediciones fueron realizadas en el ámbito de la provincia de Buenos Aires, la cual es una de las 23 provincias que componen la República Argentina. Su capital es la ciudad de La Plata. Situada en la región centro-este del país, limita al norte con las provincias de Entre Ríos y Santa Fe, al oeste con las provincias de Córdoba, La Pampa y Río Negro, al sur y al este con el mar Argentino del océano Atlántico y al nordeste con el Río de la Plata. Enclavada en el nordeste se encuentra la ciudad de Buenos Aires.

La Provincia de Buenos Aires, dispone una superficie total de 307.771 Km<sup>2</sup>, y registra una población de 15.625.084 habitantes, según el último censo realizado el 27 de octubre de 2010, siendo su capital la Ciudad de La Plata.

Dispone de un total de 134 departamentos, dentro de los cuales 24 corresponden al partido de Gran Buenos Aires, y 110 al resto de la provincia.

Dentro de las principales ciudades se destacan: La Plata, Bahía Blanca, Mar del Plata, Pergamino, San Nicolás, Necochea, Carmen de Patagones, Olavarría, Azul, Villa Gesell, entre otras.

Como centros urbanos de referencia, encontramos Mar del Plata, con 500.000 habitantes; San Nicolás, 120.000; Olavarría, con 90.000, y Junín con 80.000 habitantes. Por otra parte, como ciudades reconocidas del Gran Buenos Aires, se destacan: Avellaneda, Lanús, La Matanza, Vicente López, Quilmes, entre otros.

Buenos Aires, se encuentra ubicada en la región pampeana y limita al norte con la provincia de Santa Fe, Entre Ríos y Córdoba; al este con el Mar Argentino y el Río de la Plata; y al oeste con las provincias de Río Negro, La Pampa y Córdoba.

Refiriéndose a la provincia desde la visión desde la geografía física, la llanura pampeana se destaca como predominante, donde su planicie se ve interrumpida por dos sistemas serranos, el de "Tandilia" con unos 500 msnm, y el de "Ventana" de unos 1.100 msnm, correspondientes a las ciudades de Tandil y Sierra de la Ventana.

El punto máximo detectado es el "Cerro Tres Picos" con 1.239 msnm, y el de menor tamaño, "Salinas Chicas" a -42msnm, ubicado en el departamento de Villarino.

El río más extenso de la provincia, es el "Río Salado", con 700 km de longitud.

Si bien casi la totalidad de la Provincia de Buenos Aires, se comprende dentro de la región pampeana, donde se distinguen, mayormente, una llanura cubierta de praderas, se pueden identificar subregiones, una conocida como la "pampa ondulada", en el norte, donde su principal característica es la presencia de algún relieve con lomas provenientes de antiguos médanos fosilizados.

Por otra parte, se encuentra la "pampa deprimida", ubicada en la cuenca inferior del río Salado, la cual se destaca por su altitud relativa inferior al resto, dando lugar a la creación de lagunas, como por ejemplo la Laguna de Chascomús o la Laguna de Lobos.

En el sur de la provincia, se encuentra la "Bahía de Samborombón", donde se registra una relevante zona húmeda, que se caracteriza por tierras blandas, cangrejales, bajos pantanosos y lagunas, ubicados en el partido de General Lavalle, casi en su totalidad, y en zonas como Dolores, Maipú General Madariaga y Tordillo.

En la cuenca alta del Río Salado, donde se unen la Pampa Deprimida, con la Pampa Ondulada Alta, se puede ubicar a las lagunas de Junín (Gómez, Mar Chiquita y El Carpincho).

En cuanto a la zona de la costa atlántica, posee una extensión a lo largo de 1200 km, caracterizada por ser un lugar costero, con presencia de grandes dunas y costas acantiladas que tocan el océano, generalmente con amplias playas arenosas.

Cabe destacar, que existen dos sectores de la provincia que no corresponden completamente a la región pampeana, por un lado el sector extremo meridional, que se encuentra al sur del Río Colorado, el cual ya es perteneciente a la Patagonia argentina, sector coincidente con el partido de Patagones, y por otra parte, el sector extremo noroeste, el cual corresponde a la Mesopotamia Argentina, conocido como el Delta del Paraná. Éste, es un territorio se encuentra formado, principalmente, por islas fluviales en cantidad, las cuales son de escasa altitud y con características pantanosas, cubiertas por selvas marginales, que continúan de la selva tropical sudamericana. En esta región, se encuentra un pequeño sector de la provincia,

ubicada en el extremo norte e inmediatamente al este del Delta, conocida como la Isla Martín García, el cual es un afloramiento de rocas que nacen en el estuario del Río de la Plata.

En cuanto al clima de la Provincia de Buenos Aires, cabe destacar que es, en general, templado y húmedo, generalmente agradable y soleado.

Posee una temperatura media anual de 18 grados. Es una región húmeda, con índices que promedian el 80% entre los meses de junio y julio, llegando a máximas de 95% y medias de 65% para los meses de verano.

Esta humedad, es la que hace que el frío y el calor, se sientan con mayor intensidad.

En cuanto a los vientos, se encuentran: viento norte, viento pampero y sudestada.

El viento norte, se presenta en verano, siendo caluroso y húmedo. El viento pampero, proveniente de la zona oeste, contrarresta los efectos del viento norte. Este viento se caracteriza por ser húmedo, por un lado, el cual es acompañado de tormentas eléctricas y grandes nubarrones, o bien, puede ser frío y seco lo cual provoca un gran descenso de la temperatura. Además, se lo conoce como "pampero sucio", dado que levanta grandes polvaredas.

Por último, en cuanto a la sudestada, es un fenómeno de frío y lluvias, persistentes por varios días generando fuertes ráfagas de viento frío y húmedo, acompañado de persistentes lluvias. La sudestada suele darse en los meses de junio y octubre, provocando grandes inundaciones, aunque bien con los reiterados cambios climáticos, no sería extraño que suceda en otras épocas del año. Los períodos lluviosos se dan en otoño y primavera.

## Instrumentos de medición, técnicas y software empleado

La recolección de datos inició en el año 2014, cuando surge la necesidad de contar con una herramienta que ayude a poder estimar valores de resistividad y pH para realizar la ingeniería básica de sistemas de protección catódica a la hora de elaborar presupuestos, sin la necesidad de ir a tomar mediciones complementarias cada vez que se recibe un pedido de cotización.

Las mediciones fueron realizadas según los estándares propuestos por ASTM, siguiendo la norma ASTM-G57-2012 "Standard test method for field measurement of soil resistivity using the Wenner four-electrode method".

## Resistivímetro

El instrumento seleccionado para la recogida de datos es un resistivímetro Megabras MTD 20KWe (telurímetro y voltímetro digital de 3 ½ dígitos), N° serie: MM 9201 H con un rango de resistencias (20-200-200)  $\Omega$  y 20 k $\Omega$ .

Al momento de iniciar los relevamientos, el instrumento fue inspeccionado y ensayado en el laboratorio eléctrico de metrología de la Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería en las condiciones de referencia establecidas por el fabricante, utilizando los procedimientos de calibración propios del Laboratorio Eléctrico de Metrología. Se verificó que en las funciones y rangos indicados, en sus dos conexiones cumple con las exactitudes especificadas en la página 40 del manual de instrucciones,  $\Omega$ :  $\pm 0,05\%$ ; V:  $\pm 0,1\%$ ; evaluadas en base a la incertidumbre estándar (tipo B) de una distribución rectangular multiplicada por un factor de cobertura de 1,65 correspondiente a una probabilidad de cobertura del 95%. A una temperatura de  $23 \pm 1$  °C y HR 55 al 75%. El procedimiento de calibración fue realizado periódicamente en abril 2013, 2014, 2015 y 2016 para asegurar el correcto funcionamiento del instrumento de medición.



**Ilustración 15 - Resistivímetro Megabras 20 MTD20Kwe – Fuente: Megabras**

Según el fabricante [40], el resistivímetro digital MTD-20KWe es capaz de medir resistencias de puesta a tierra y resistividad del terreno a través del método Wenner. Puede ser utilizado en instalaciones industriales, edificios, hospitales, pararrayos, etc. Realizando mediciones de

resistividad se puede evaluar los estratos del terreno para mejorar el diseño de sistemas de puesta a tierra.

Posee filtros activos y pasivos que logran tener una gran inmunidad a las interferencias eléctricas y permite medir de manera mucho más confiable.

La corriente inyectada para realizar las mediciones es regulada electrónicamente, es alternada con una frecuencia de 1470Hz, lo cual permite evaluar adecuadamente el comportamiento de la instalación de PAT tanto en relación a una falla de frecuencia industrial como frente a una descarga atmosférica.

Puede ser utilizado en condiciones geográficas y ambientales adversas, con temperaturas extremas en regiones frías o tropicales y elevadas alturas en zonas montañosas, por lo que presenta un óptimo desempeño en los trabajos de campo, en cualquier situación [40].

## Electrodo de antimonio

El pH del suelo fue medido utilizando un electrodo AGRA de antimonio. Este se utiliza en conjunción con un electrodo de sulfato de cobre para formar una célula sensible al pH. La tensión desarrollada entre los dos electrodos en contacto con el mismo electrolito proporciona una medición que se convierte en el pH del electrolito. El electrodo ya viene calibrado, con una escala de conversión en su lateral para obtener el pH. [41]



**Ilustración 16 - Electrodo de antimonio - Fuente: MCMiller Company**

En la Ilustración 17, se puede observar cómo se simula una medición vinculando el electrodo de antimonio y el electrodo de cobre sulfato de cobra al voltímetro para obtener el valor de pH sobre el terreno de contacto. Por ejemplo, si el voltaje medido es 469mV, en el caso de



suelo húmedo el pH medido en la escala del electrodo de antimonio será aproximadamente 6,8.



**Ilustración 17 - Simulación de medición de pH en batea - Fuente: Manual de instrucciones operativas MCMiller Co.**

## Multímetro

El instrumento seleccionado para realizar la medición de pH junto a los electrodos de antimonio y cobre sulfato de cobre fue un multímetro Fluke 77 N° serie: 63860066. El mismo reúne todas las funciones necesarias para solucionar la mayoría de los problemas eléctricos y electrónicos. Este multímetro es muy fácil de usar, disminuyendo la posibilidad de error a la hora de realizar la toma de mediciones.



**Ilustración 18 - Multímetro FLUKE 77 – Fuente: Fluke**

Al momento de iniciar los relevamientos el instrumento fue inspeccionado y ensayado en el laboratorio eléctrico de metrología de la Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería en las condiciones de referencia establecidas por el fabricante, utilizando los procedimientos de calibración propios del Laboratorio Eléctrico de Metrología. Se verificó que en todas sus funciones y rangos cumple con las exactitudes especificadas en los datos técnicos respectivos. El procedimiento de calibración fue realizado periódicamente en abril 2013, 2014, 2015 y 2016 para asegurar el correcto funcionamiento del instrumento de medición.

## GPS diferencial

Para el posicionamiento de los datos se utilizó un equipo GPS diferencial Marca Trimble, modelo PRO XRT con corrección en tiempo real provista por la firma Omnistar, logrando alcanzar precisiones menores a 30cm en la geolocalización de cada una de las muestras recolectadas.



**Ilustración 19 - Receptor Trimble PRO XRT – Fuente: Trimble**

El Trimble PRO XRT es un receptor GNSS (sistema global de navegación por satélite) flexible de alta precisión en tiempo real y post-proceso para relocalización y mantenimiento de infraestructura crítica. Soporta recepción de señal Omnistar, lo cual permite trabajar de forma independiente sin necesidad de contar con una estación base. La precisión del receptor GNSS en Argentina es de hasta 30 cm en tiempo real utilizando el servicio Omnistar XP y post-proceso. El receptor trabaja en forma conjunta con un colector de datos conectado mediante la tecnología Bluetooth o si lo prefiere, vía cable serial.

### Colector de datos Nomad 900G

Para el almacenamiento de los datos se utilizó un colector de datos marca Trimble, modelo NOMAD 900G. Los dispositivos de mano GPS integrados de la serie Trimble Nomad 900G son diseñados para un rendimiento superior en entornos difíciles, siendo compatibles con todas las aplicaciones de software de Trimble Mapping & GIS, y vienen en varias configuraciones para que el usuario pueda elegir según el tipo de trabajo que requiera.



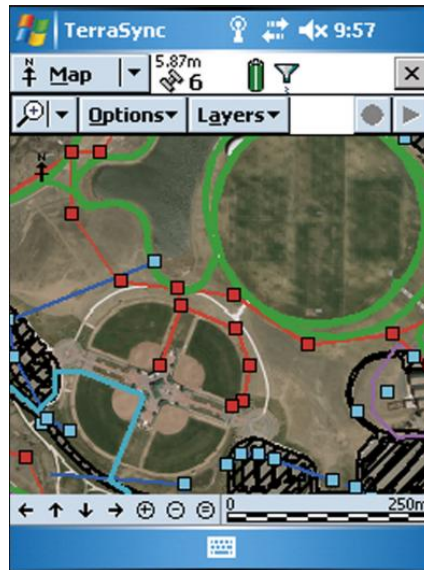
**Ilustración 20 - NOMAD 900G – Fuente: Trimble**

Este dispositivo viene equipado con un receptor GPS integrado de alto rendimiento diseñado para la captura de datos productiva en condiciones GPS difíciles (como bosques frondosos o cerca de edificios altos). Los modelos de la serie Nomad 900G son ideales para aplicaciones donde la alta productividad es esencial, por ejemplo levantamientos forestales o gestión de recursos naturales [42].

Esta PDA es capaz de correr el software Terrasync para la recolección de datos, vinculándola al receptor PRO-XRT.

## Terrasync

Para registrar y administrar los datos GIS dentro de la PDA se utilizó el software Terrasync. Este software es muy potente y permite registrar datos de posición y características para luego ser introducidos dentro de bases de datos GIS de forma rápida y eficaz.



**Ilustración 21 - Terrasync Profesional 5.0 – Fuente: Trimble**

Sin importar la aplicación de campo y de la complejidad de los datos a registrar, este software permite registrar datos de alta calidad rápida y fácilmente mediante flujos de trabajo sencillos y eficientes.

Permite la posibilidad de incorporar diccionarios de datos ya creados en el software Trimble GPS Pathfinder Office, según los requisitos del sistema de información geográfica del usuario [43]. Es por este motivo que fue seleccionado, debido a la posibilidad de crear diccionarios de datos que permiten a los operadores de campo crear características y asignar valores de atributo cumplan con la estructura de los datos SIG y también mantengan la integridad de los datos, mediante la creación de un archivo con extensión \*.SSF que no permite alteración alguna. Luego estos datos pueden ser visualizados y procesados en el software Trimble Pathfinder Office.

## Trimble GPS Pathfinder Office

El software Trimble GPS Pathfinder Office es un paquete de herramientas de posprocesamiento GNSS potente y fácil de usar que incorpora tecnología de corrección diferencial Trimble DeltaPhase diseñada para desarrollar información de sistemas SIG uniforme, confiable y precisa a partir de los datos GNSS capturados en el campo.

La capacidad del software permite generar proyectos con archivos de atributos asociados a los datos GPS digitalizados, de manera de obtener finalmente mapas en cualquier escala, sistema de coordenadas, datums y elipsoides seleccionados por usuario. Los mapas y archivos asociados pueden ser actualizables continuamente y convertidos finalmente a más de 140 GIS

disponibles en el mercado, entre ellos ARC/INFO, AUTO CAD, INTERGRAPH, ERDAS, GEO/SQL, GRASS, MOSS, etc. Todos los datos pueden ser clasificados, filtrados, representados gráficamente con simbologías definidas por usuario y ploteados. El mismo tiene vínculo directo a software de diseño y mapeo CAD [44].

El Trimble Pathfinder Office se utilizó para el armado del diccionario de campo a utilizar en la PDA y para el procesamiento inicial de los datos, brindando la posibilidad de exportarlos y poder ser tratados en Arcmap.

Un diccionario de datos consiste en una descripción de las características y atributos relevantes a un proyecto o trabajo particular, estructura la captura de datos y se utiliza para controlar la captura de características y atributos.

Un diccionario de datos le solicita al operador introducir información; también puede limitar lo que se introduce para asegurar la integridad de los datos y la compatibilidad con el sistema GIS. A pesar de que los mismos no siempre son necesarios para el trabajo de campo, hacen que la captura, actualización y el procesamiento de datos sea más fácil y rápida.

Un diccionario de datos está compuesto de los siguientes elementos:

- una lista de características a capturar en el campo;
- una lista de atributos (si los hubiere) que describen cada característica;

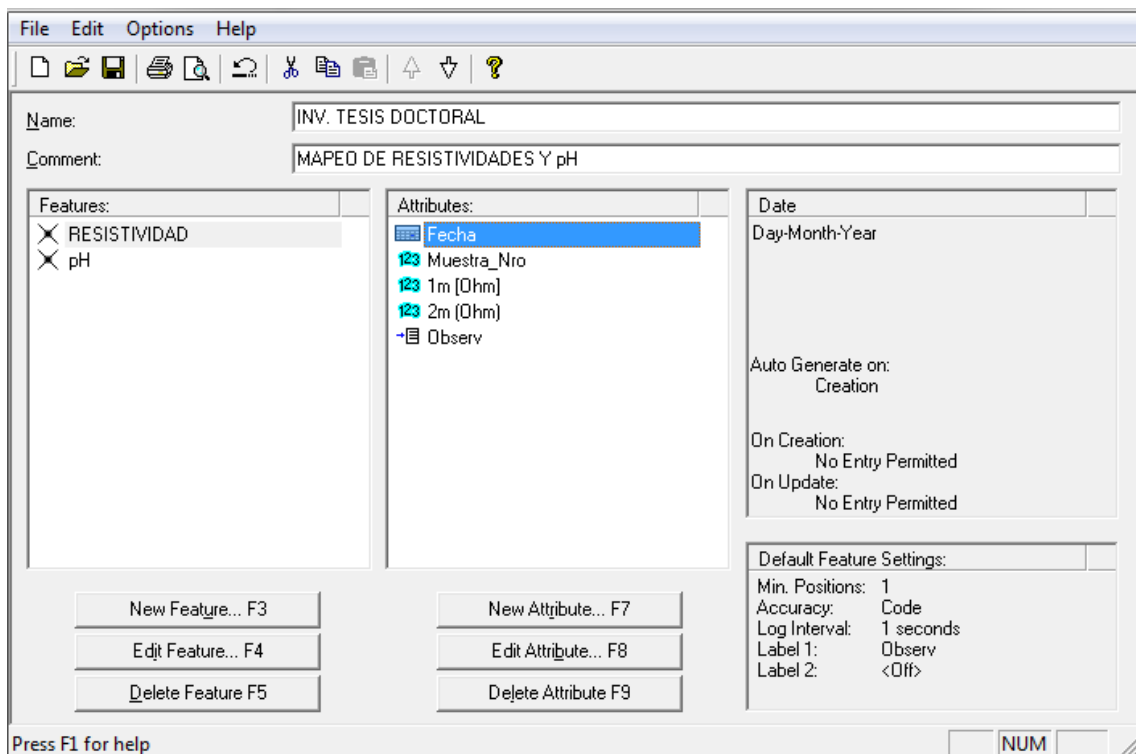
El mismo deberá contener todas las características para las que desea capturar información [45].

El diccionario creado para la toma de muestras, se diseñó buscando un entorno simple y amigable para el operador con el fin de agilizar los trabajos en campo. Se crearon 2 características principales:

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>ATRIBUTOS</b>	<b>COMENTARIOS</b>
<b>RESISTIVIDAD</b>	Fecha Muestra N° 1m[Ω] 2m[Ω] Observaciones	Dentro de la característica resistividad el relevador solo tiene la posibilidad de cargar la resistencia medida a 1 y 2m de profundidad y un campo extra de observaciones por si en la zona encuentra alguna anomalía que deba aclarar. Todos los demás campos se completan automáticamente, como ser el número de

		muestra, fecha y geolocalización.
<b>PH</b>	<p>Fecha</p> <p>Muestra N°</p> <p>pH</p> <p>Observaciones</p>	<p>Dentro de la característica pH el relevador solo tiene la posibilidad de cargar la medición tomada con el multímetro y el electrodo de antimonio y un campo extra de observaciones por si en la zona encuentra alguna anomalía que deba aclarar. Todos los demás campos se completan automáticamente, como ser el número de muestra, fecha y geolocalización.</p>

**Tabla 3 - Características y atributos diccionario de datos**



**Ilustración 22 - Captura de Trimble Pathfinder Office, diseño de diccionario para relevamiento de campo**

## ArcMap

ArcMap es la aplicación central utilizada en ArcGIS. ArcMap es el lugar donde visualiza y explora las base de datos GIS del área de estudio, donde se asignan símbolos y donde se crea los diseños de los mapas para imprimir o publicar. Es la aplicación que utiliza para crear y editar base de datos. ArcMap representa la información geográfica como una colección de capas y otros elementos en un mapa. Agrupa cientos de herramientas para realizar análisis espaciales. Estas herramientas te permiten convertir datos en información y automatizar muchas de las tareas de GIS.

## Procedimiento de recolección y análisis de muestras

### Investigación previa

Se efectuó esta investigación en conjunto con la empresa Montamar S.R.L. líder en el rubro de la protección catódica en la República Argentina, quienes facilitaron el equipamiento y los recursos necesarios para poder llevarla adelante. A su vez pusieron a disposición su base de datos de mediciones históricas para poder comenzar a diagramar el alcance de la investigación.

### Diseño del levantamiento de datos

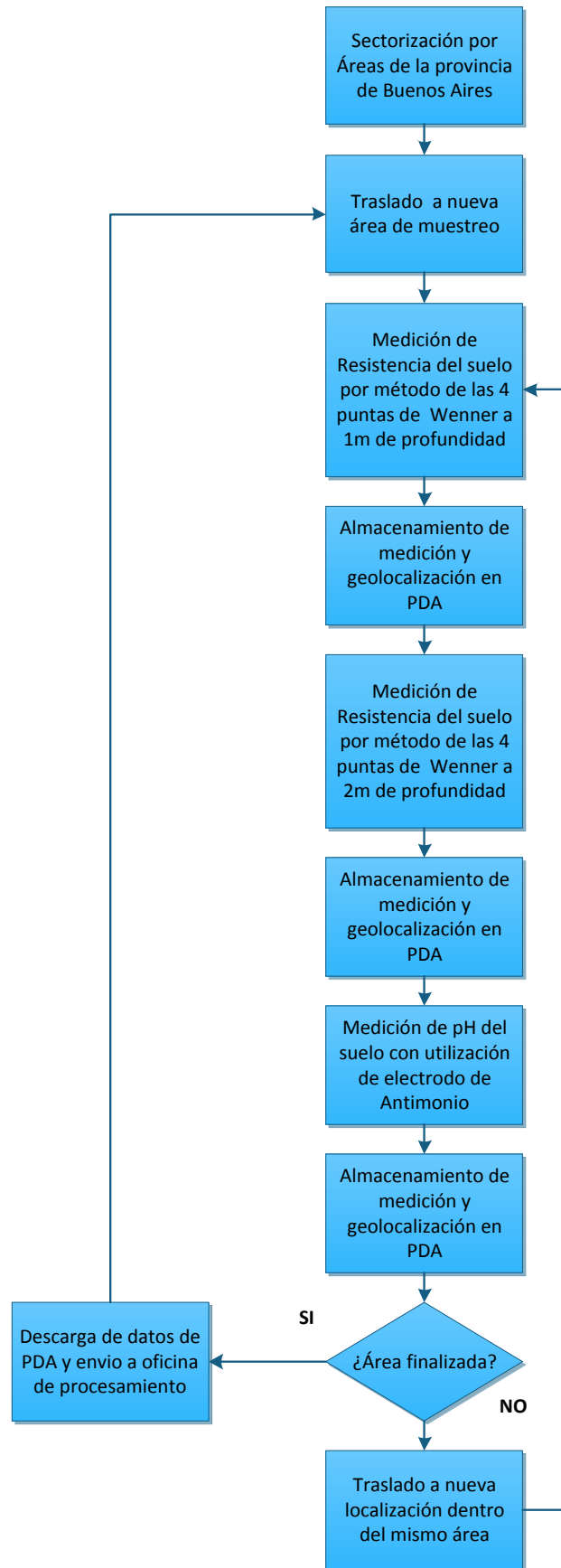
Durante esta actividad de gabinete se definieron los parámetros y equipamiento a ser utilizados durante la fase de adquisición de datos.

Antes de comenzar con la recolección de muestras fue necesario determinar las áreas donde se debería realizar la toma de datos. Las mismas fueron obtenidas a partir de la generación de una cuadrícula sobre la provincia de la Buenos Aires dividida cada medio grado de latitud y longitud.





## Proceso de recolección de muestras



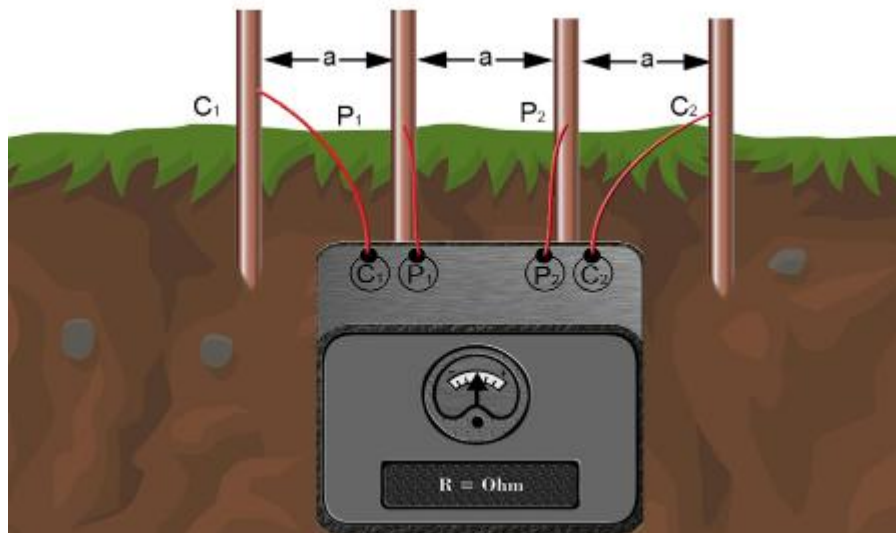
**Ilustración 24 - Procedimiento de recolección de muestras**

Cuando el equipo de relevamiento llega al área de muestreo inicia el proceso de búsqueda de zonas donde puedan ser realizadas las mediciones. Una vez determinado el lugar a medir se procede a realizar las mediciones de resistividad. Los elementos componentes del dispositivo son:

- Resistímetro de cuatro bornes de corriente alterna
- Jabalinas
- Cables

Las jabalinas son de bronce y se clavan en el terreno  $1/10$  de la profundidad a medir resistencia y los cables del tipo extraflexible, de una longitud acorde a la separación entre lanzas especificada, con ficha banana en uno de los extremos y pinza cocodrilo en el otro.

A la hora de medir la resistencia a 1 metro de profundidad se deben clavar las jabalinas alineadas en el suelo a una distancia "a" igual a la profundidad que se quiere conocer el valor de resistencia. Mediante la utilización de los cables de conexión se vinculan al resistímetro según la Ilustración 25 y se procede a tomar la medición. Para realizar la siguiente medición se realiza la misma secuencia separando 2 metros la distancia "a" entre las jabalinas.



**Ilustración 25 - Conexión de resistímetro – Fuente: Elaboración propia**



**Ilustración 26 - Medición de resistividad en campo**

Durante el proceso de recolección de datos, se encontraron muchas zonas de la provincia de Buenos Aires bajo agua. A pesar de esta condición del suelo es factible realizar las mediciones (ver Ilustración 27) llegando a los lugares más complicados mediante la utilización de vehículos 4x4, a los fines de tener la mayor cantidad de muestras posibles y conociendo que la humedad es un factor fundamental y modificador de la capacidad de conducción eléctrica del suelo.



**Ilustración 27 - Medición de resistividad zona anegada**

Seguido de la medición de resistividad, se realiza la medición de pH a través de un electrodo de antimonio y uno de cobre sulfato de cobre junto a un multímetro.



**Ilustración 28 - Medición de pH en terreno**

Luego estos datos son almacenados en el GPS Trimble PRO-XRT para su posterior procesamiento.

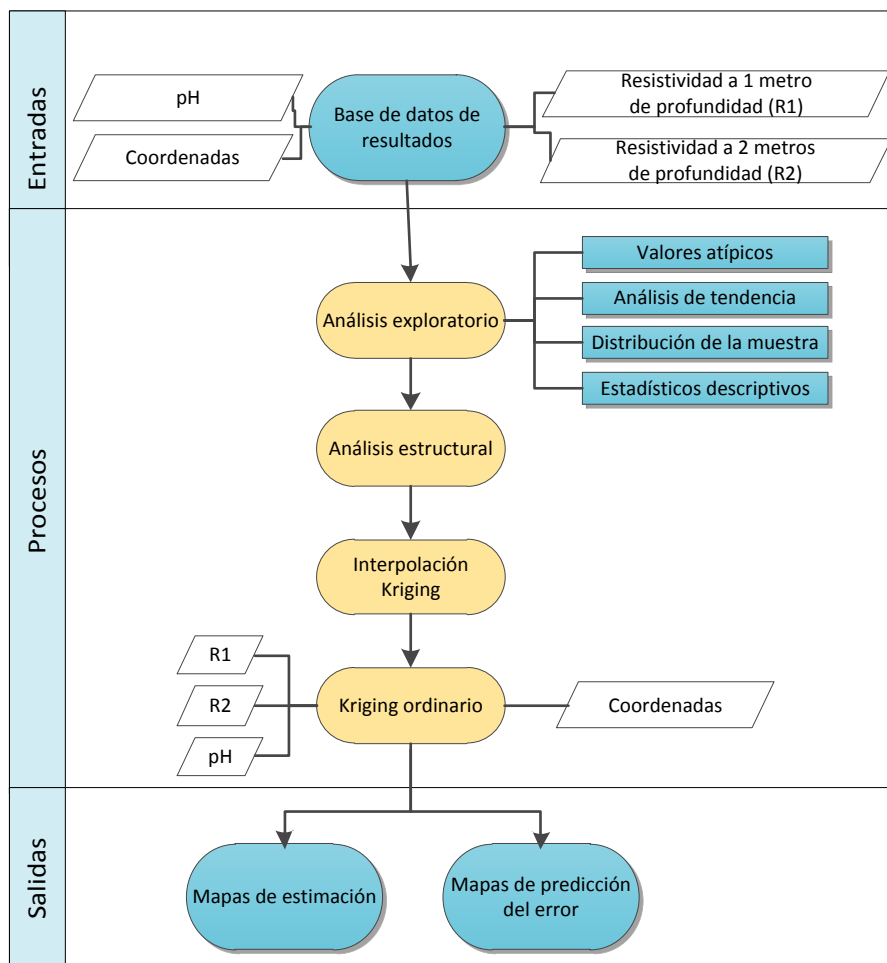


**Ilustración 29 - Almacenamiento de datos en NOMAD 900 - Trimble PRO-XRT**

Una vez que los datos son descargados desde la PDA utilizando el software Trimble Pathfinder Office en formato \*.SSF encriptado son enviados a procesamiento.

## Proceso de análisis de datos

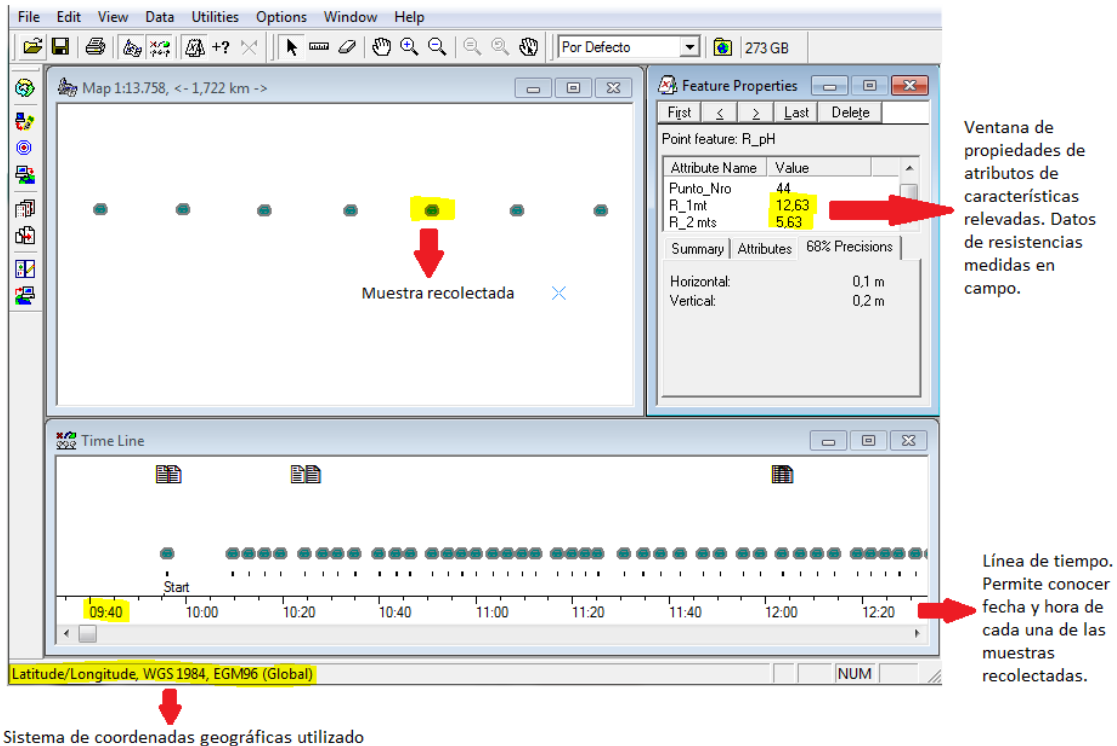
Cuando los archivos recibidos en formato \*.SSF proveniente del proceso de recolección de muestras son recibidos se inician las tareas de análisis de datos en gabinete.



**Ilustración 30 - Proceso de análisis de datos**

En primer lugar es necesario utilizar el software Trimble GPS Pathfinder Office para abrir el \*.SSF encriptado con los datos recolectados de las mediciones. Una vez que los datos son levantados por el software es posible visualizar todas las mediciones realizadas con su ubicación geográfica, fecha y hora de recolección y todos los valores medidos (ver Ilustración 31). Por medio de este software es posible convertir los datos relevados a múltiples formatos. Como el valor relevado en campo es resistencia a 1 y 2 metros, es necesario calcular la

resistividad. Por tal motivo todos los datos son exportados a Excel para poder realizar la conversión de manera masiva y sencilla. Existe la posibilidad de exportarlo directamente a \*.SHP y procesarlo íntegramente en ArcMap pero el paso intermedio en Excel permite procesar y limpiar los datos de una manera más clara y sencilla.



**Ilustración 31 - Visualización de muestras en Trimble GPS Pathfinder Office**

Ya en Excel y con todos los datos exportados, se aplica la formula simplificada desarrollada por el Dr. Frank Wenner, ya que la distancia enterrada de los electrodos con los que se realizaron las mediciones es pequeña comparada con la distancia de separación entre electrodos.

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot A \cdot R$$

Dónde:

$\rho$ : Resistividad promedio a la profundidad A

A: Distancia de separación entre los electrodos [cm]

R: Lectura en Ohms [ $\Omega$ ] del resistivímetro

La resistividad obtenida como resultado de las ecuaciones representa la resistividad promedio de un hemisferio de terreno de un radio igual a la separación de los electrodos.



pH	Resistividad [Ωcm] 1m	Resistividad [Ωcm] 2m	Latitud GG.gggg	Longitud GG.gggg	Resistencia [Ω] 1.0m	Resistencia [Ω] 2.0m	Fecha	Observaciones
6,23	3267,26	4146,90	-38,42585876	-61,37436555	5,20	3,30	1/4/16	
6,49	3185,58	3958,41	-38,42840895	-61,3736574	5,07	3,15	1/4/16	
6,38	3034,78	3870,44	-38,43059035	-61,37307386	4,83	3,08	1/4/16	
6,14	2990,80	3694,51	-38,43277679	-61,37249268	4,76	2,94	1/4/16	
6,27	2852,57	3619,11	-38,4350033	-61,37188564	4,54	2,88	1/4/16	
6,49	2739,47	4385,66	-38,43676053	-61,37141024	4,36	3,49	1/4/16	

**Tabla 4 – Fragmento de planilla de procesamiento de datos**

**Fuente: Elaboración propia con datos de muestras relevadas**

Una vez que los datos se encuentran disponibles, se inicia el análisis exploratorio para identificar, entender y buscar tendencias en los datos, con este análisis se describen cualitativa y cuantitativamente los datos. Representando los datos en figuras y diagramas buscando identificar observaciones atípicas "outliers", calcular los estadísticos descriptivos, identificar las poblaciones bajo estudio e identificar la distribución de probabilidad.

Una vez finalizado el análisis exploratorio de los datos, se procede a realizar el análisis estructural de estos mediante la técnica geoestadística Kriging Ordinario.

La herramienta empleada para realizar un análisis geoestadístico ha sido el ArcMap, con la extensión "Geo-statistical Analyst". Esta extensión provee de una variedad de herramientas para la exploración de datos espaciales, identificación de datos anómalos, predicciones óptimas, evaluación de predicciones dudosas y creación de superficies. Este módulo utiliza puntos de las muestras tomadas en diferentes localizaciones y crea una superficie continua [46].

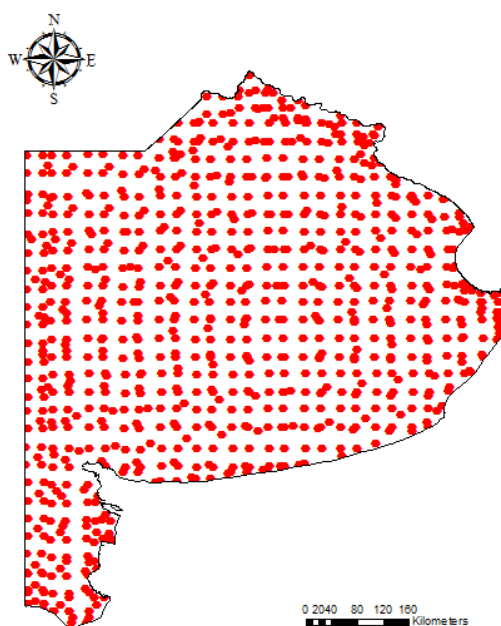
# Capítulo 4

## Resultados y Discusión

Una vez concluida la recolección de muestras a lo largo y ancho de la provincia de Buenos Aires como se puede observar en Ilustración 32, se procede al análisis de datos.

Para poder comprender los resultados obtenidos es menester tener presente el tamaño y la diversidad de suelos que puede haber dentro de la provincia de Buenos Aires donde predomina la llanura pampeana con una inclinación suave hacia el Mar Argentino interrumpido por dos pequeños sistemas serranos, el de Tandilia de unos 500 msnm y el de Ventana de unos 1.100 msnm.

Si bien casi la totalidad de la Provincia de Buenos Aires, se comprende dentro de la región pampeana, donde se distinguen, mayormente, una llanura cubierta de praderas, se pueden identificar subregiones, una conocida como la "pampa ondulada", en el norte, donde su principal característica es la presencia de algún relieve con lomas provenientes de antiguos médanos fosilizados. Dos sectores no corresponden a esta región: el sector extremo meridional emplazado al sur del río Colorado que es ya perteneciente a la Patagonia Argentina y el sector extremo noreste que corresponde fisiográficamente y ecológicamente a la Mesopotamia Argentina.



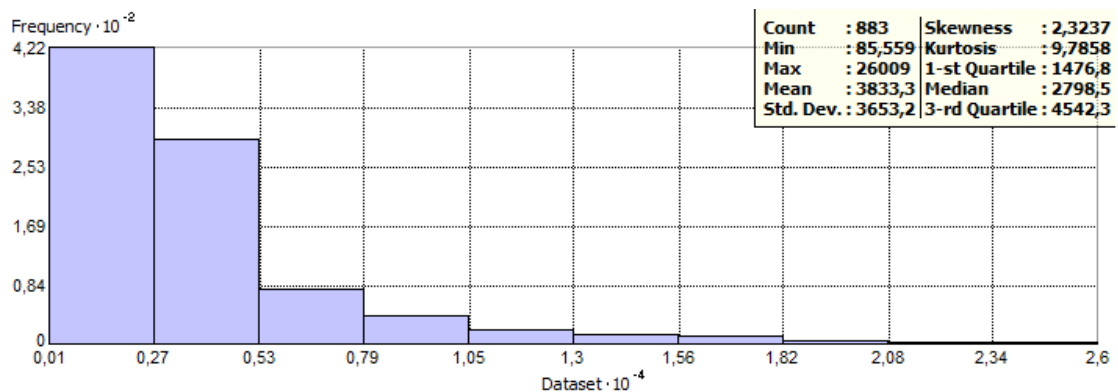
**Ilustración 32 - Puntos Muestreados Resistividad y pH**

Finalizada la toma de muestras, se procede a analizar cada una de las variables recolectadas:

## Resistividad a 1 metro de profundidad - (R1)

### Análisis exploratorio

### Determinación de la normalidad de la muestra - (R1)



**Ilustración 33 – Histograma, variable "Resistividad a 1 metro de profundidad"**

Cuando al trazar una vertical, en el histograma, de una variable, según sea esta discreta o continua, por el valor de la media, está vertical, se transforma en eje de simetría.

Las medidas de asimetría, sobre todo el coeficiente de asimetría de Fisher, junto con las medidas de apuntamiento o curtosis se utilizan para contrastar si se puede aceptar que una distribución estadística sigue la distribución normal.

Según sea el valor de CS, se puede decir que la distribución es asimétrica derecha o positiva, a izquierda o negativa, o simétrica, o sea:

Si  $CS > 0$  la distribución será asimétrica positiva o a derecha (desplazada hacia la derecha).

Si  $CS < 0$  la distribución será asimétrica negativa o a izquierda (desplazada hacia la izquierda).

Si  $CS = 0$  la distribución puede ser simétrica; si la distribución es simétrica, entonces sí podremos afirmar que  $CS = 0$ .

El coeficiente de sesgo de la muestra recolectada para la variable "Resistividad a 1 metro de profundidad" es de 2,32.

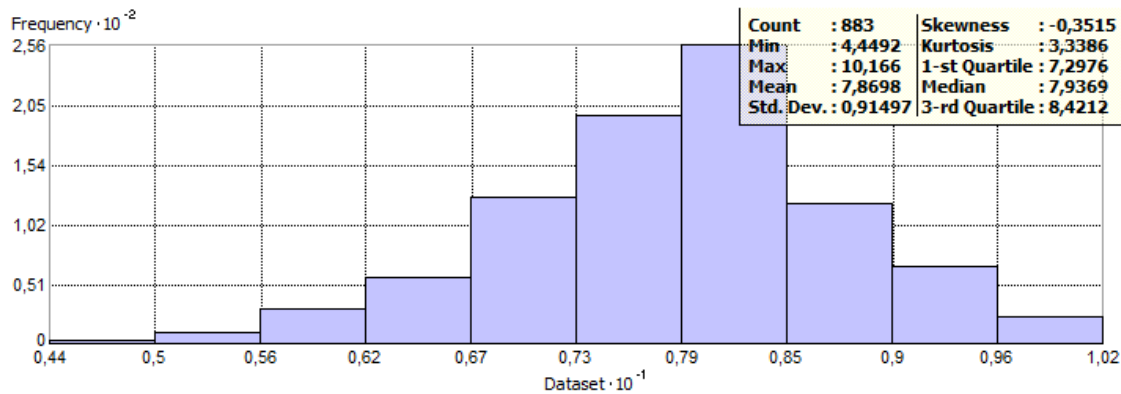
Para determinar el grado de apuntamiento que tiene la distribución se utiliza el coeficiente de curtosis de Fisher, si:

Si  $K > 3$  la distribución será leptocúrtica o apuntada

Si  $K = 3$  la distribución será mesocúrtica o normal

Si  $K < 3$  la distribución será platicúrtica o menos apuntada que lo normal.

La distribución de la variable "Resistividad a 1 metro de profundidad" es del tipo leptocúrtica y asimétrica positiva, por lo tanto es necesario aplicar una transformación del tipo logarítmica, para obtener una distribución normal de la muestra.



**Ilustración 34 - Histograma, variable "Resistividad a 1 metro de profundidad" con transformación logarítmica"**

## Coeficiente de variación - (R1)

El coeficiente de variación de Pearson indica la relación existente entre la desviación típica de una muestra y su media. Por lo tanto es necesario realizar la verificación de normalidad con respecto al coeficiente de variación.

Tanto la función de distribución de los datos, como la varianza son funciones de la media, la cual es altamente sensible a los valores extremos. Se debe verificar:

Si  $CV < 100$  no hay problemas con los valores extremos.

Si  $100 < CV \leq 200$  los efectos causados por los valores extremos de los datos son tolerables.

Si  $CV > 200$  se tienen severos problemas con los valores extremos de los datos.

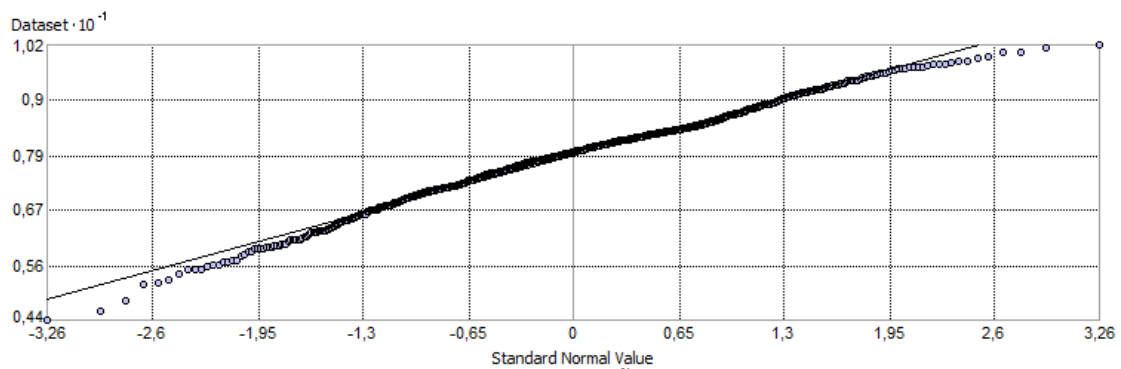
$$CV = \left(\frac{S}{X}\right) * 100$$

$$CV_{R1} = \left(\frac{3653,20}{3833.30}\right) * 100$$

$$CV_{R1} = 95,30$$

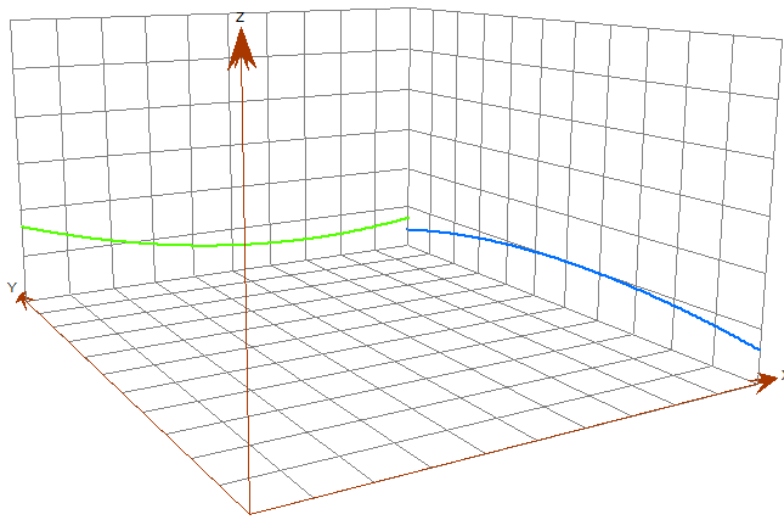
Se puede determinar que con un valor de coeficiente de variación de 95,30 los efectos causados por los valores extremos de los datos no son un problema.

Una vez aplicada la transformada logarítmica a la variable resistividad a 1 metro de profundidad la misma se encuentra normalizada con pequeñas desviaciones en sus extremos.



**Ilustración 35 - Valor normal estándar de variable "Resistividad a 1 metro de profundidad"**

A través de la realización de un gráfico de tendencia se puede determinar el grado del polinomio y la tendencia de la muestra.

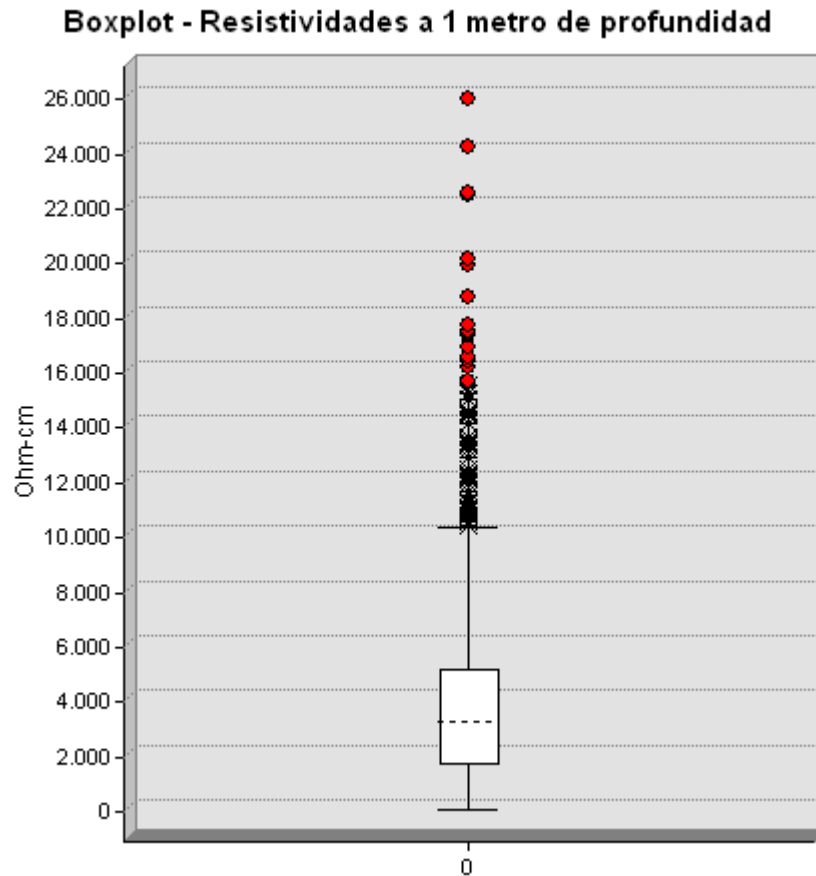


Rotation Angles	
Location:	0°
3D Graph	—
Horizontal:	120°
Vertical:	-11,5°

**Ilustración 36 - Gráfico de tendencia, variable "Resistividad a 1 metro de profundidad"**

A través del gráfico de tendencia, se puede observar con una línea color verde como está varia de este a oeste y con una línea color azul la variación de norte a sur. La línea color verde muestra un aumento de los niveles de "Resistividad a 1 metro de profundidad" hacia el oeste; mientras que la línea azul, muestra niveles más altos de "Resistividad a 1 metro de profundidad" en el centro del área de estudio con decaimiento en dirección norte y sur. A simple vista se puede afirmar que esta muestra tiene una tendencia de segundo orden.

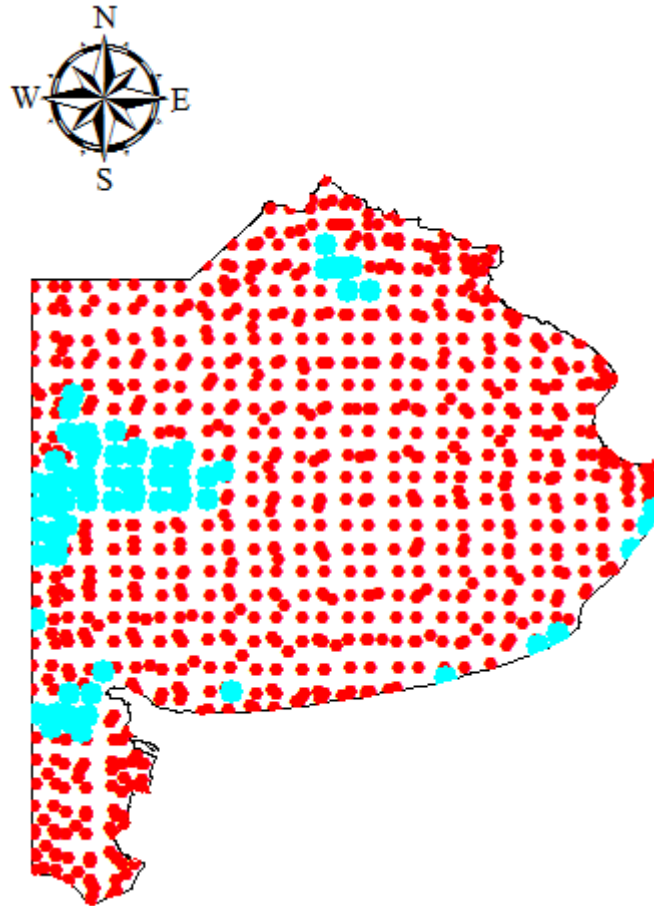
## Valores atípicos - (R1)



**Ilustración 37 – Boxplot variable “Resistividades a 1 metro de profundidad”**

A través de la utilización de un gráfico de caja se observa que hay una gran cantidad de valores atípicos (outliers) los cuales deben ser tratados y analizados a los fines de poder determinar la razón de los mismos.

Se procedió a seleccionar todos los valores atípicos por fuera del gráfico de cajas e identificar la ubicación geográfica a la cual pertenecen tal como se observa en Ilustración 38.

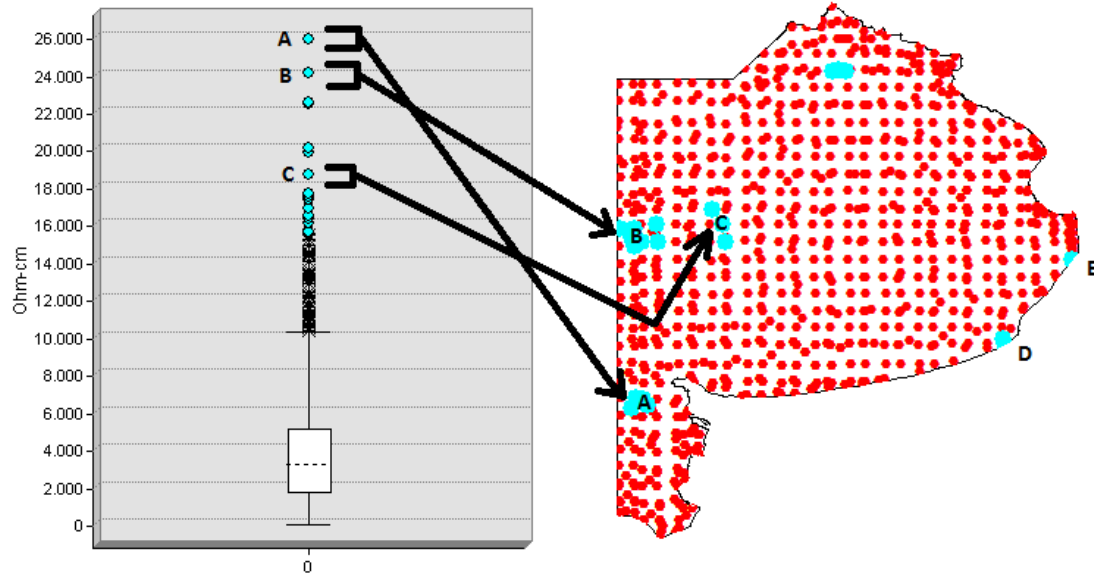


**Ilustración 38 - Valores atípicos Resistividad a 1 metro**

Al tener identificados todos los valores atípicos se procedió a identificar los valores extremos y determinar su ubicación a fin de poder realizar un análisis específico de los mismos.



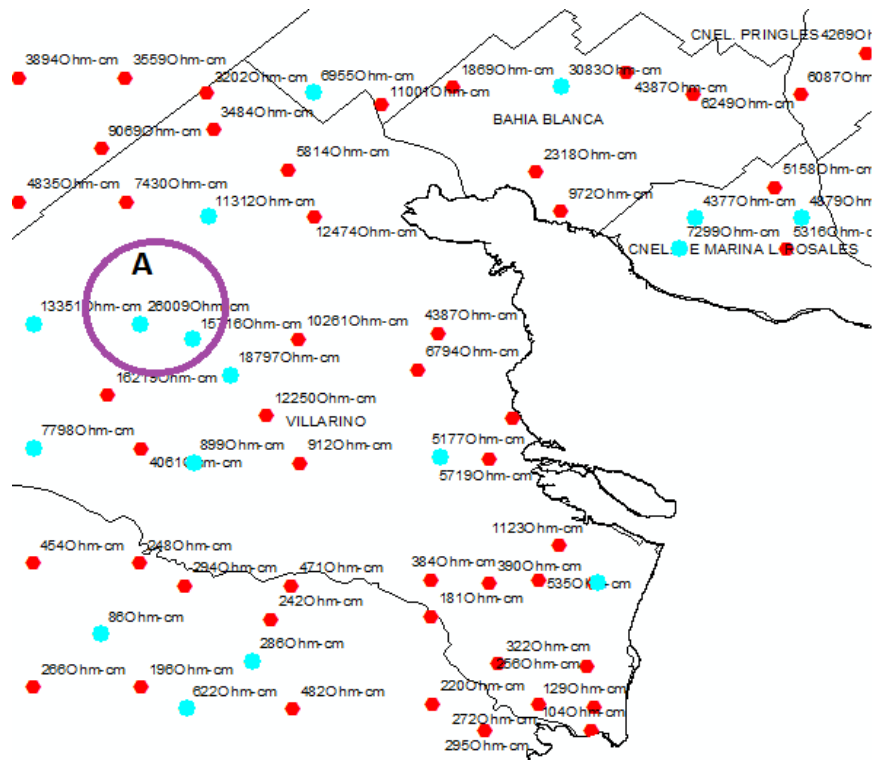
**Boxplot - Resistividades a 1 metro de profundidad**



**Ilustración 39 - Geolocalización de valores atípicos variable "Resistividad a 1 metro de profundidad"**

Para el análisis de valores atípicos se determinó que aquellas muestras similares aglomeradas en zonas cercanas, son correspondientes a sectores del suelo de la provincia de Buenos Aires con algún tipo de disparidad respecto a la media de la provincia y cuando una de las muestras toma valores significativamente diferentes a las de la zona de medición se procedió a efectuar reiteradas mediciones en lugares aledaños para poder determinar qué es lo que sucede en dicho lugar.

En el partido de Villarino, situado al sudoeste de la provincia, limitado al norte por los partidos de Puan, Tornquist, Bahía Blanca y al sur por el Río Colorado se encontró un valor atípico extremo como se puede observar en la Ilustración 40 y por tal motivo se procedió a realizar un relevamiento más específico.



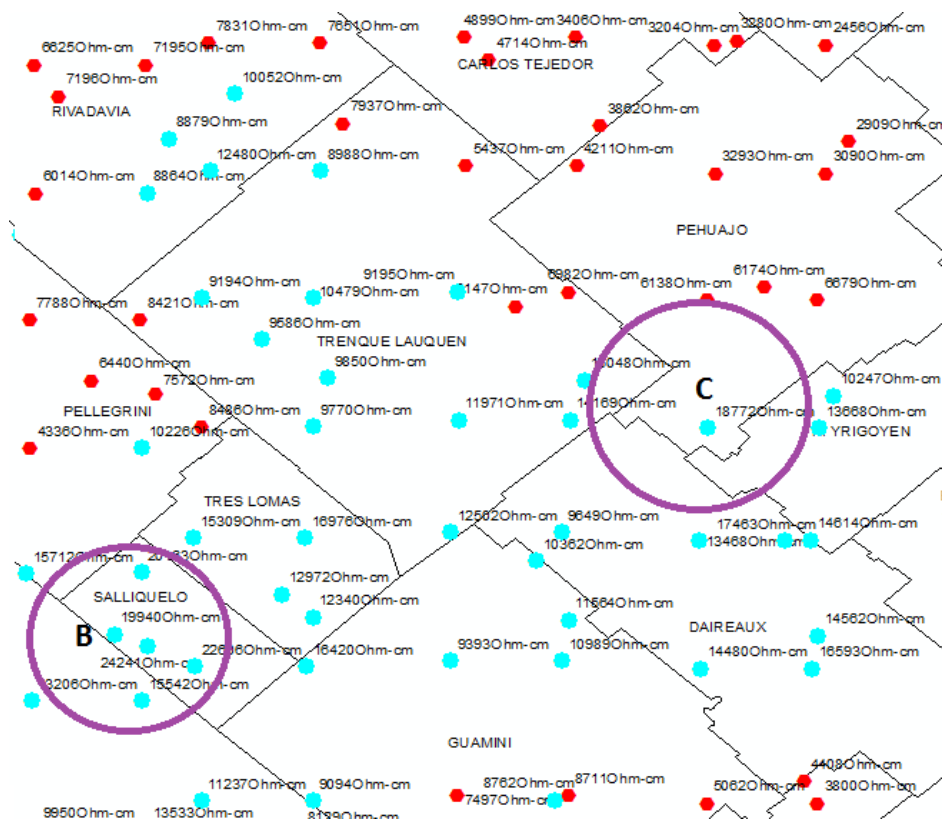
**Ilustración 40 - Valor extremo de variable "Resistividad a 1 metro de profundidad" localizada en el partido de Villarino**

A través de la utilización de imágenes satelitales se puede determinar que es una zona llana, sin desarrollo urbano. Se observa que el valor atípico extremo mantiene relación con todas las muestras aledañas recolectadas. Y considerando que se encuentra localizada en una zona donde los suelos que predominan son del tipo aridisoles (suelos de regiones áridas) y considerando una de las hipótesis de investigación "Los terrenos más húmedos de la provincia de Buenos Aires tienen resistividades más bajas que aquellos lugares donde suele haber menores reservas de agua" se puede determinar que dichas mediciones son completamente normales según su ubicación geográfica y el tipo de suelo de dicha región.



**Ilustración 41 – Imagen satelital de valor extremo de variable "Resistividad a 1 metro de profundidad" localizada en el partido de Villarino – Fuente: Google Earth**

Otros valores extremos de la variable "Resistividad a 1 metro de profundidad" fueron encontrados en los partidos de Saliquelo y Pehuajo. Estos valores mantienen relación con todas las demás muestras recolectadas a sus alrededores en los partidos de Trenque Lauquen, Tres Lomas, Guaminí, Daireaux, Rivadavia, Yrigoyen Y Pelegrini, como se observa en la Ilustración 42. Los partidos de Saliquelo y Pehuajo según la Soil Taxonomy tienen suelos del tipo Molisoles (suelos negros o pardos que se desarrollaron a partir de sedimentos minerales en climas templados húmedos a semiáridos, pero también, pueden presentarse en regímenes fríos y cálidos, con una vegetación mayormente conformada por gramíneas). Los valores extremos fueron encontrados en zonas de actividad agrícola como se puede observar en la Ilustración 43, por lo que dicha zona podría llegar a estar influenciada por la utilización de algún tipo de fertilizante, pero evidentemente son valores característicos de la zona.

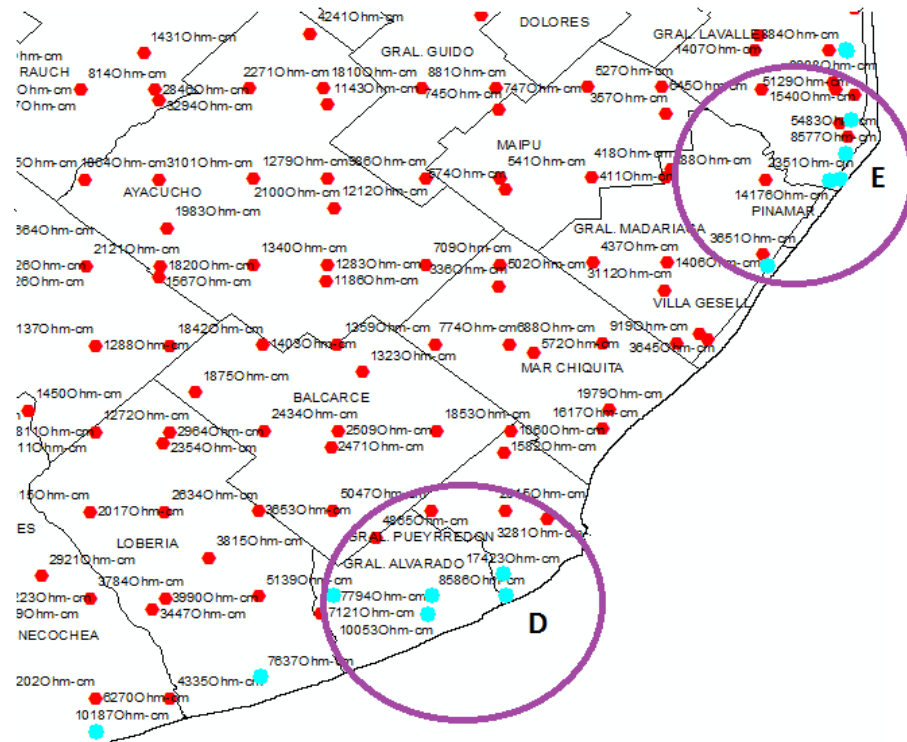


**Ilustración 42 - Valores extremos de variable "Resistividad a 1 metro de profundidad" localizados en los partidos de Pehuajo y Salliquelo**



**Ilustración 43 - Imágenes satelitales de valores extremos de variable "Resistividad a 1 metro de profundidad" localizados en los partidos de Pehuajo y Salliquelo - Fuente: Google Earth**

Finalmente los últimos valores extremos encontrados para la variable "Resistividad a 1 metro de profundidad" se encuentran localizados en la costa este de la provincia de Buenos Aires en General Lavalle, Pinamar y General Alvarado, aglomerados con muestras similares como se observa en la Ilustración 44. En esta zona encontramos suelos del tipo Molisoles y Vertisoles (suelos muy ricos en arcillas expandibles, por lo que se agrietan fuertemente durante la estación seca, la mayoría de los años) con baja conductividad eléctrica.



**Ilustración 44 - Valores extremos de variable "Resistividad a 1 metro de profundidad" localizados en la costa de la provincia de Buenos Aires**



**Ilustración 45 - Imágenes satelitales de valores extremos de variable "Resistividad a 1 metro de profundidad" localizados en la costa de la provincia de Buenos Aires - Fuente: Google Earth**

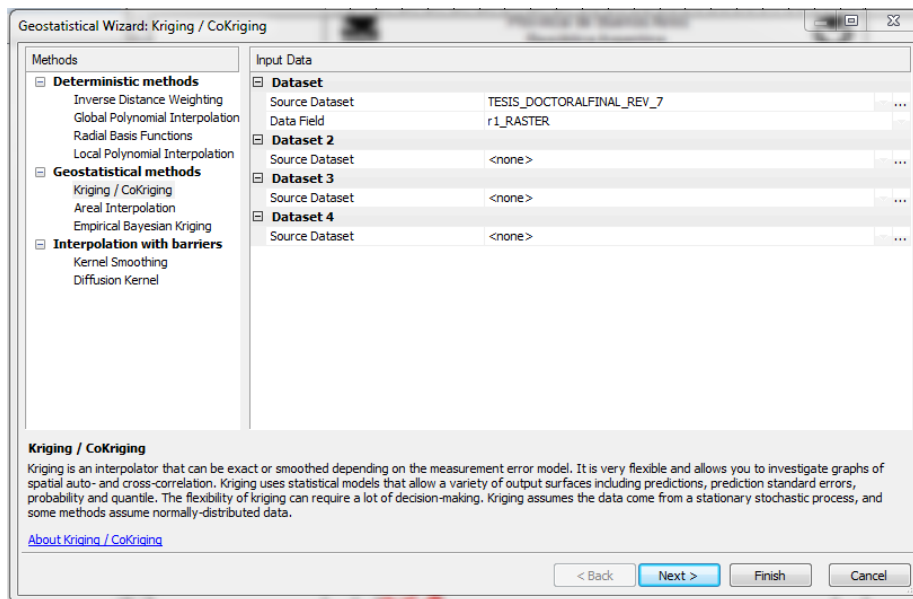
Como conclusión del análisis exploratorio para la variable "Resistividad a 1 metro de profundidad" y que se debe tener en cuenta durante la realización del análisis estructural de los datos, se obtuvo:

- Los datos originales no siguen una distribución normal, por lo tanto se debe aplicar una transformación logarítmica.
- La tendencia es de segundo orden.

## Análisis estructural de los datos - (R1)

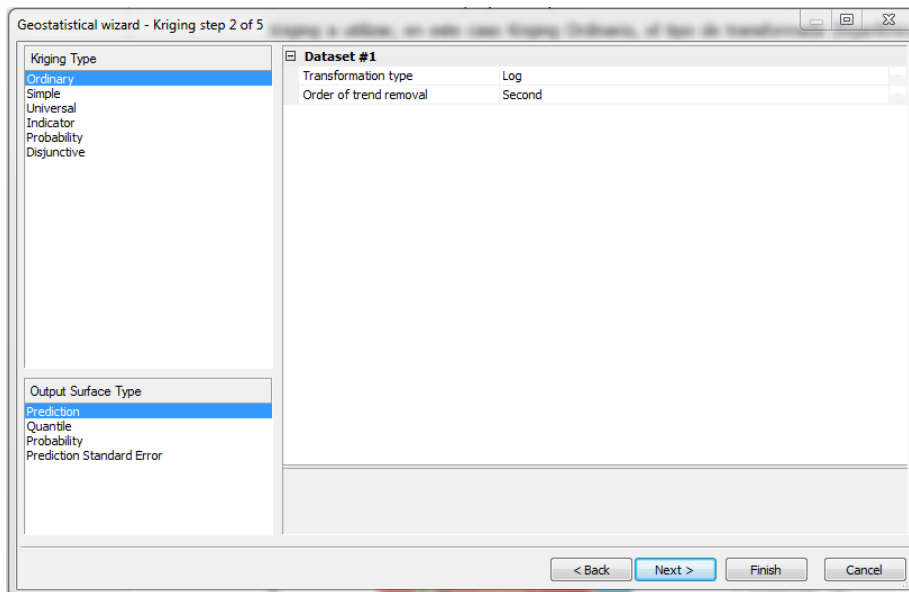
Una vez que se identificó la tendencia de los datos, la distribución de la muestra y se evaluaron los valores atípicos, el siguiente paso es el análisis estructural y realización del modelo geostatístico. Para llevarlo adelante se utilizó el módulo Geostatistical Analyst de Arcmap. El método seleccionado para el análisis de los datos fue el Kriging Ordinario.

A través del Geostatistical Wizard de Arcmap se selecciona el método de interpolación a utilizar, la capa a evaluar y el campo de datos correspondiente a las mediciones de resistividad a 1 metro de profundidad de la provincia de Buenos Aires.



**Ilustración 46 - Geostatistical Wizard: Kriging**

Una vez seleccionada la capa y el campo de datos a evaluar es necesario determinar el tipo de Kriging a utilizar, en este caso Kriging Ordinario, el tipo de transformada (logarítmica) y el orden de la tendencia que como se vio anteriormente es cuadrática (segundo orden).

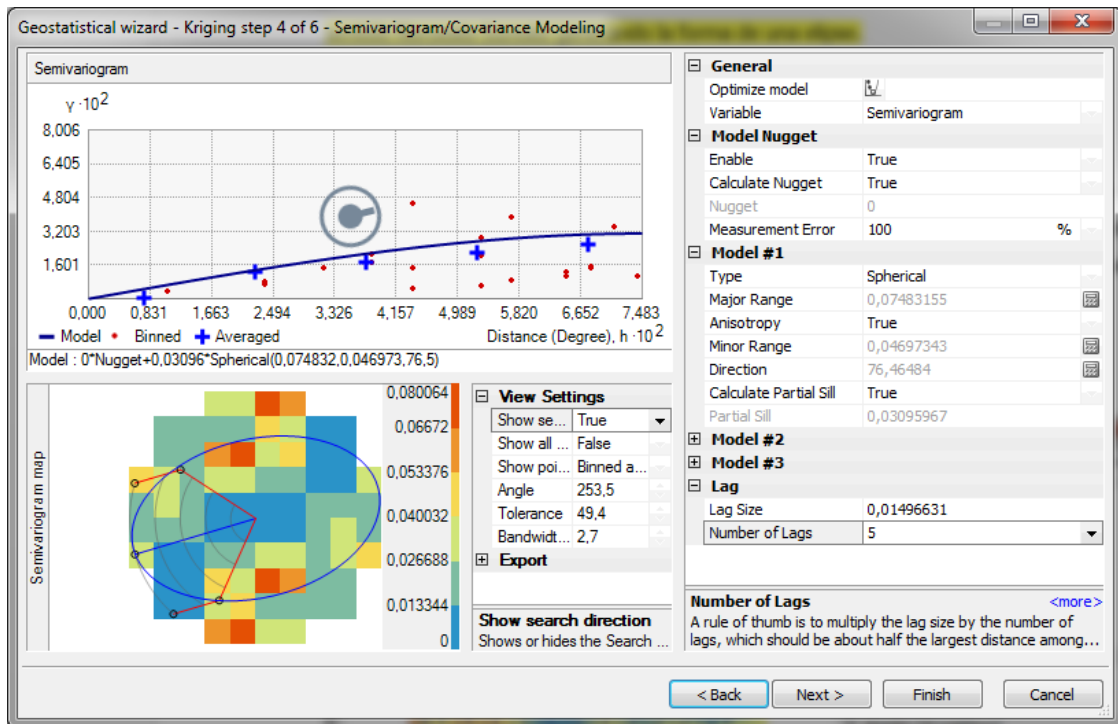


**Ilustración 47 - Geostatistical Wizard: Kriging, tipo de transformación y orden de la tendencia**

En el cuadro de diálogo siguiente se afina el modelo del semivariograma a ajustar, para este análisis en particular se seleccionó el tipo de modelo esférico, buscando la curva que mejor se adapte al promedio de la muestra. Cada punto del semivariograma corresponde a la media de los valores de variabilidad de todos los puntos agrupados en cada pixel de la superficie de tendencia.

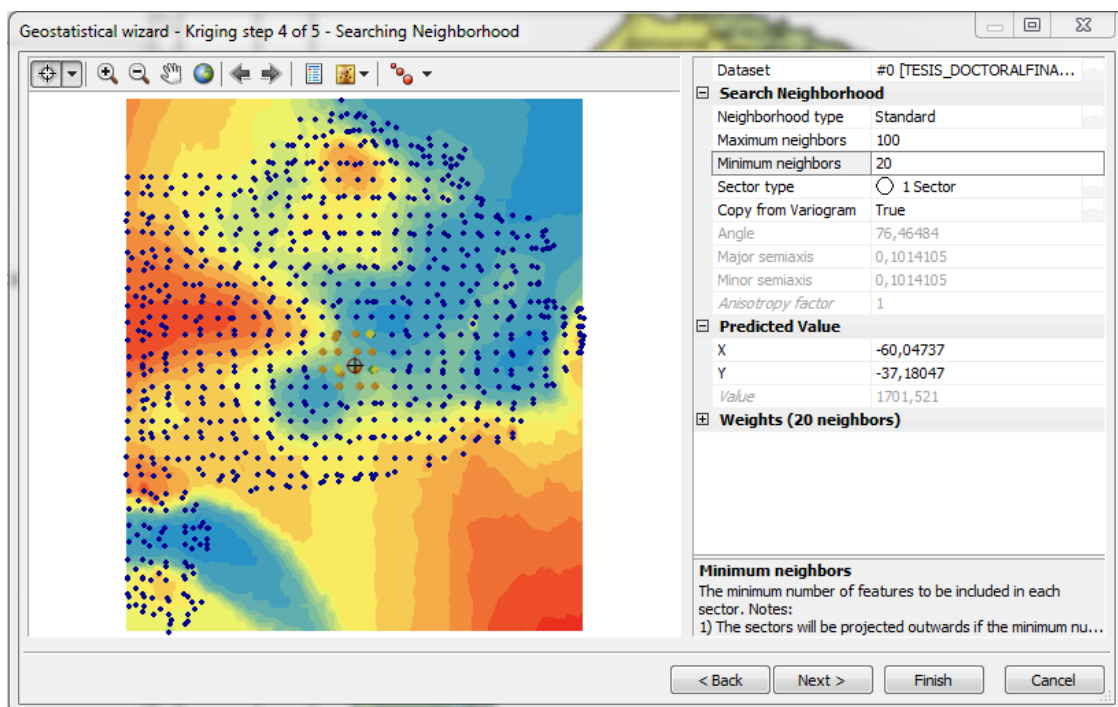
A fin de identificar el número apropiado de lags (segmentos), se ensayaron varios valores, identificando que un valor de 5 es un número apropiado para estos datos, pues se observó que cuando el número de lags es mayor que 5, los valores estimados se alejan de la media, y cuando el número de lags es menor que 5, se generan valores estimados que, al graficarlos, generan círculos sobre los puntos con valores conocidos. El lag size (valor promedio de distancia entre los puntos muestreados) fue determinado por el mismo software como la mejor opción.

Se observa en el mapa del semivariograma que la muestra varía más rápido en el sentido Noreste-Suroeste. Debido a que la correlación entre los datos depende de la dirección en la que está se calcule se dice que hay anisotropía. Por tal motivo fue necesario activar la función de anisotropía, lo que permitió visualizar la elipse de tendencia y se determinó utilizar un Angulo de 253.5° con un ancho de banda de 2.7 para disminuir la presencia de algunos datos consideramos como atípicos "outliers".



**Ilustración 48 - Geostatistical Wizard: Semivariograma**

Finalmente se obtiene un cálculo recomendado por el software ya corregido en función de los parámetros de anisotropía y pesos asignados para cada muestra, procesando la interpolación final con un máximo de 100 vecinos, un mínimo de 20 y 1 sector de búsqueda de muestras para interpolación.



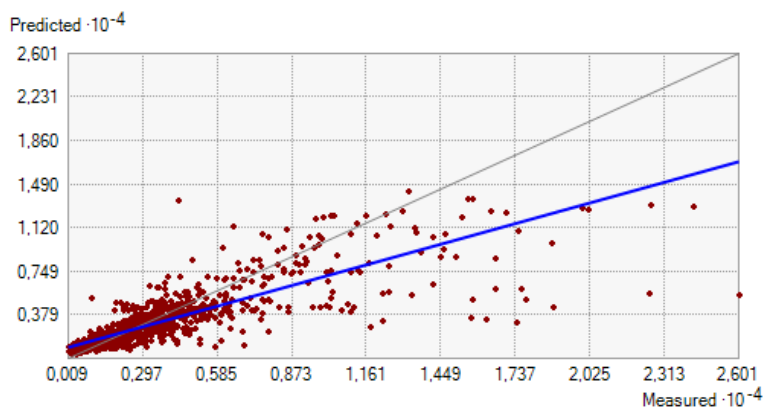
**Ilustración 49 - Geostatistical Wizard: Selección de vecinos y formato de sector de búsqueda**



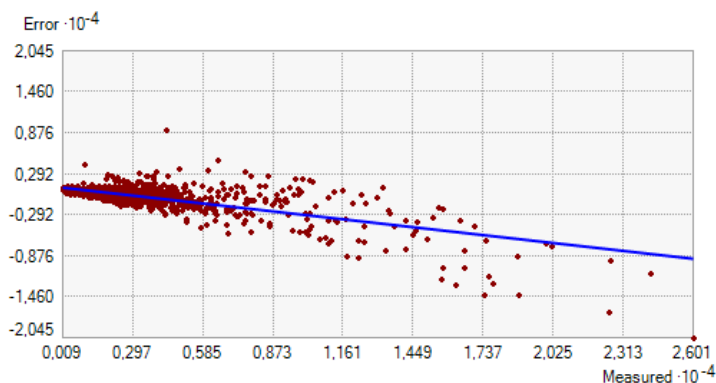
<b>Muestras</b>	883 de 883
<b>Mean</b>	-466,1602
<b>Root-Mean-Square</b>	2271,96
<b>Men Standardized</b>	-0,571595
<b>Root-Mean-Square Standardized</b>	3,344482
<b>Average Standard Error</b>	760,5726

**Tabla 5 - Cálculo de error y recta de regresión**

El software brinda la posibilidad de realizar una validación cruzada a través de un algoritmo opera omitiendo un dato conocido, luego tomando los datos restantes estima el dato descartado y compara el valor del resultado estimado con el valor que inicialmente se tenía de él. De manera secuencial se procede con todos los demás datos. Los resultados se muestran en una gráfica en la cual la abscisa representa los datos conocidos, *Measured*, y la ordenada los datos estimados, *Predicted*.



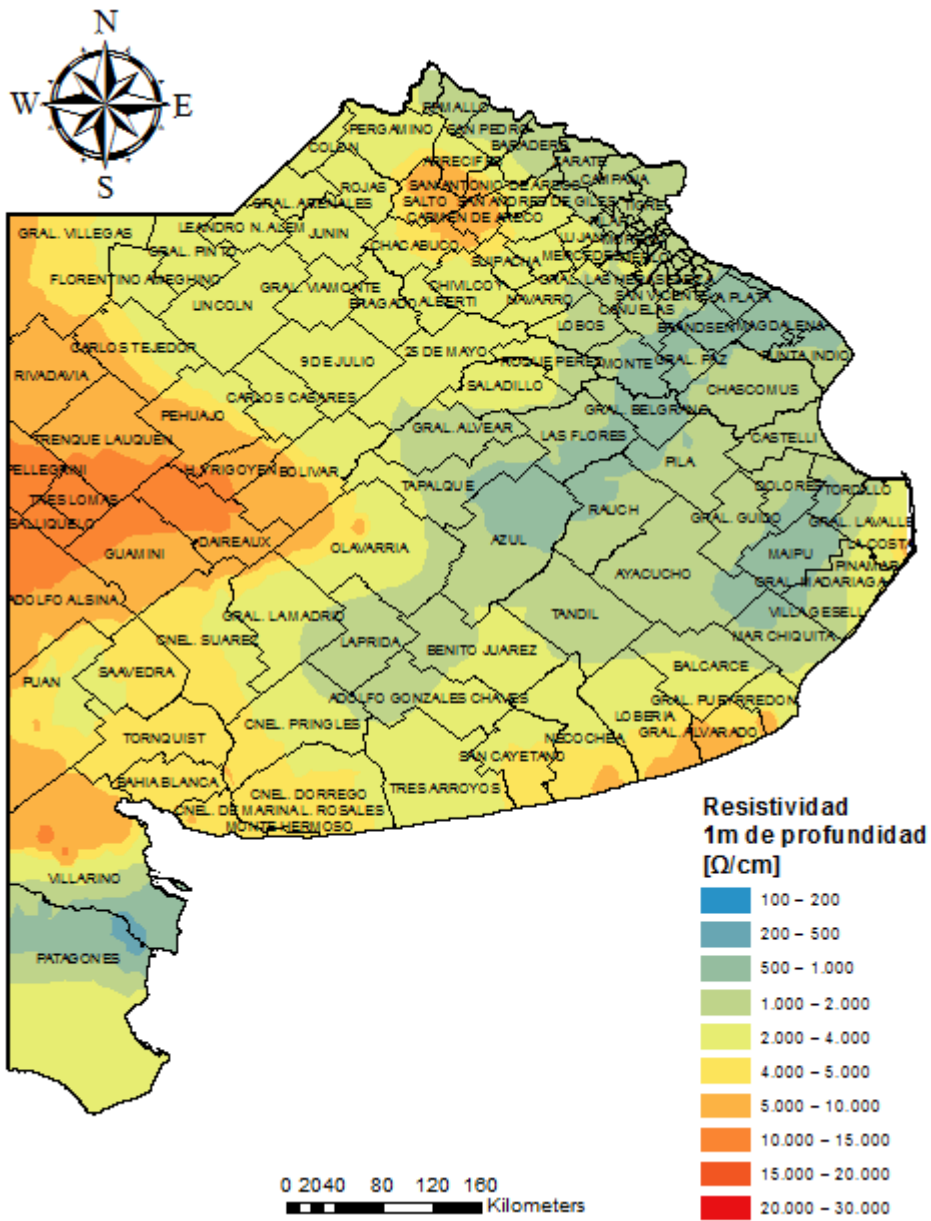
**Ilustración 50 - Gráfico de valores medidos vs predicción, variable "Resistividad a 1 metro de profundidad"**



**Ilustración 51 - Gráfico de valores medidos vs error, variable "Resistividad a 1 metro de profundidad"**

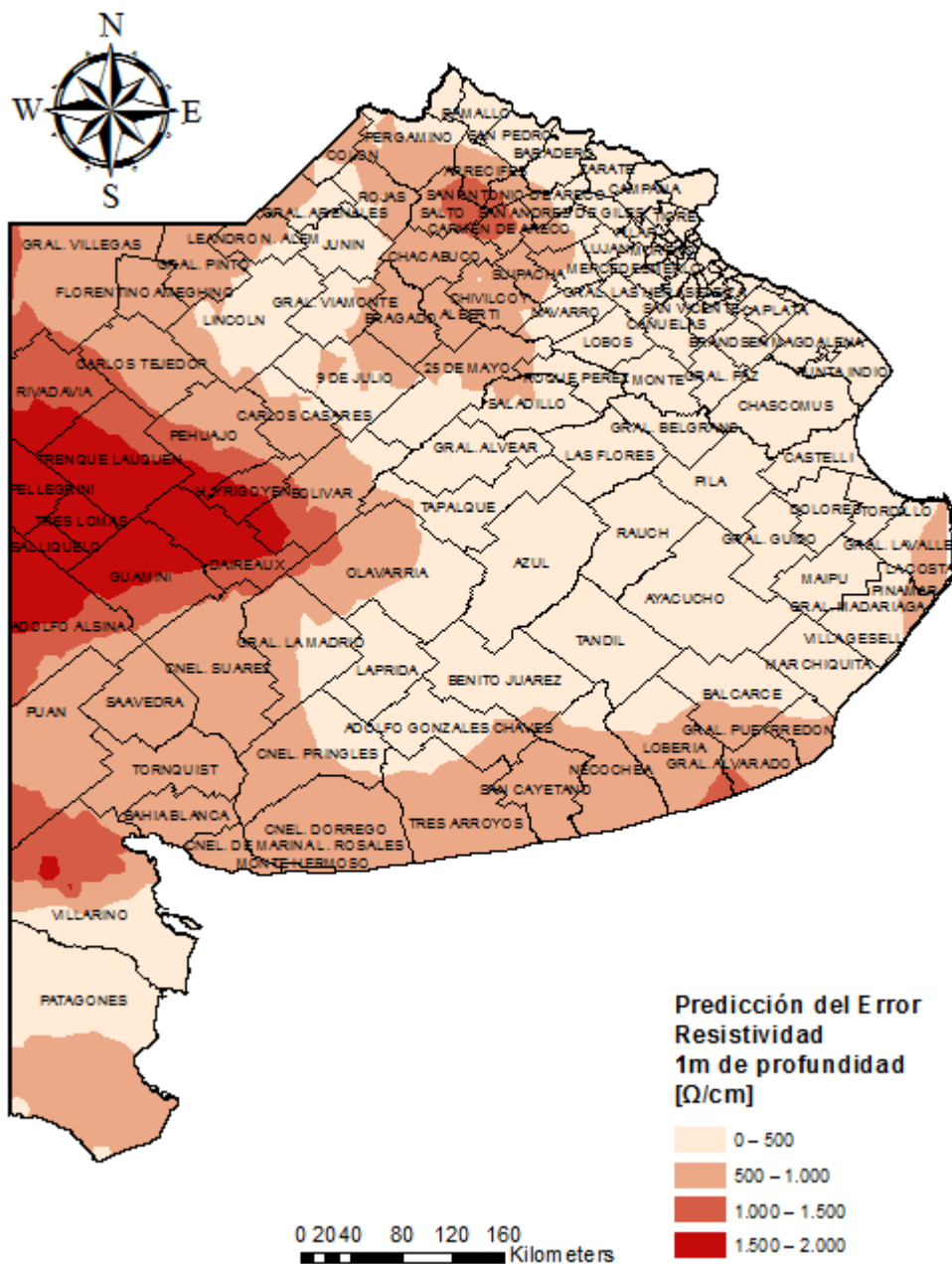
Como se observa en la Ilustración 50, y en la Ilustración 51, los valores predecidos por el método de interpolación Kriging ordinario en relación a los medidos, comienzan a dispersarse a medida que aumentan las resistividades a 1 metro de profundidad relevadas en campo. Esto se debe principalmente a que como se vio anteriormente existen determinadas zonas con suelos característicos y altamente resistivos, que al ser contrastados contra la media de la provincia generan estas grandes diferencias. Manteniendo el error dentro de este umbral (error estándar promedio de  $760 \Omega/\text{cm}$ ) no sería perjudicial para la creación y utilización del mapa de resistividades a 1 metro de profundidad. Pero buscando mejorar la fiabilidad del mismo es menester crear un mapa del error para poder determinar las zonas donde pueda llegar a ser necesario realizar algún estudio adicional.

Finalmente se presenta el mapa correspondiente a la provincia de Buenos Aires interpolado por el método Kriging Ordinario, correspondiente a la variable "Resistividad a 1 metro de profundidad".



**Ilustración 52 - Mapa de resistividad a 1 metro de profundidad de la Provincia de Buenos Aires**

A su vez es presentado el mapa de estimación de error correspondiente a la variable "Resistividad a 1 metro de profundidad".

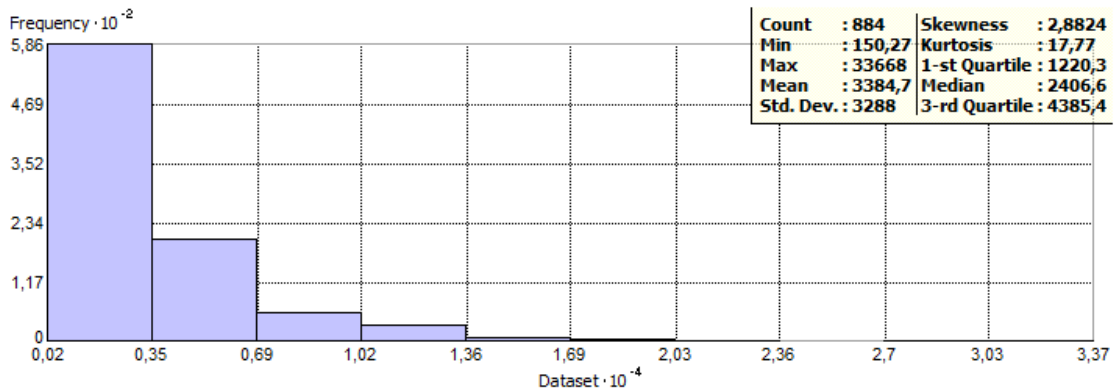


**Ilustración 53 - Predicción del error de resistividad a 1 metro de profundidad de la Provincia de Buenos Aires**

## Resistividad a 2 metros de profundidad - (R2)

### Análisis exploratorio

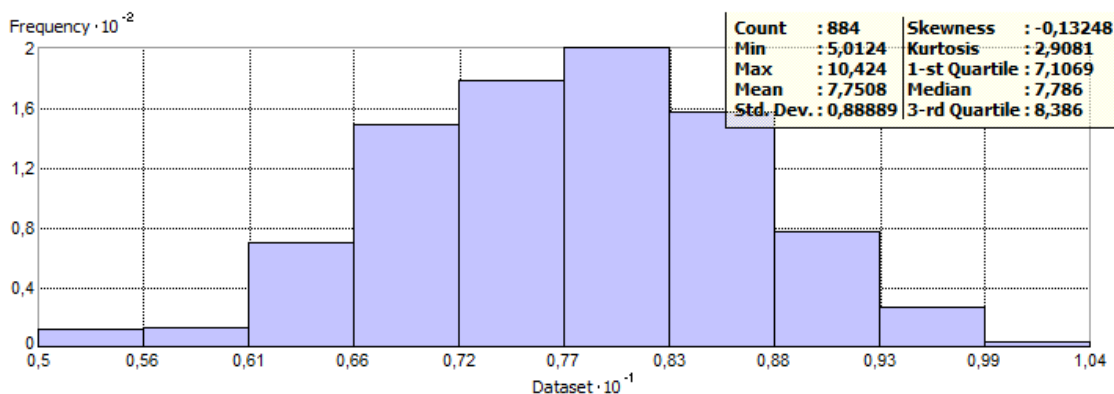
#### Determinación de la normalidad de la muestra - (R2)



**Ilustración 54 – Histograma, variable "Resistividad a 2 metros de profundidad"**

El coeficiente de sesgo de la muestra recolectada para la variable "Resistividad a 2 metros de profundidad" es de 2,88.

La distribución de la variable "Resistividad a 2 metros de profundidad" es del tipo leptocúrtica y asimétrica positiva, por lo tanto es necesario aplicar una transformación del tipo logarítmica, para obtener una distribución normal de la muestra.



**Ilustración 55 – Histograma, variable "Resistividad a 2 metros de profundidad" con transformación logarítmica**

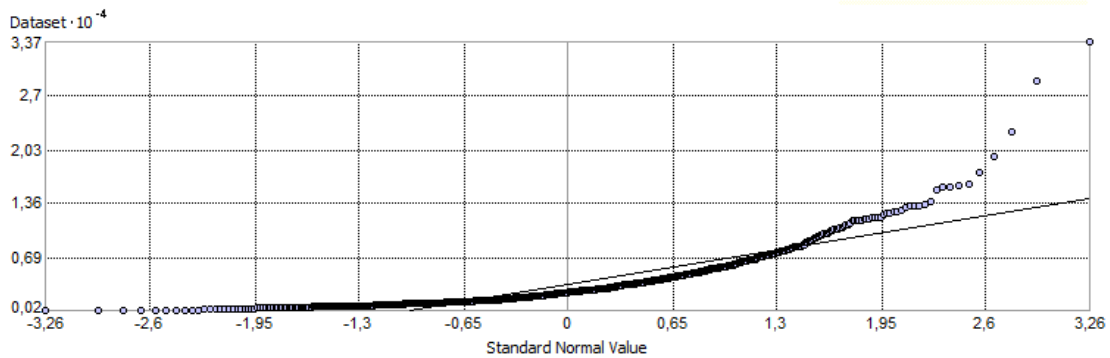
## Coeficiente de variación - (R2)

$$CV_{R2} = \left( \frac{3288}{3384,70} \right) * 100$$

$$CV_{R2} = 97,14$$

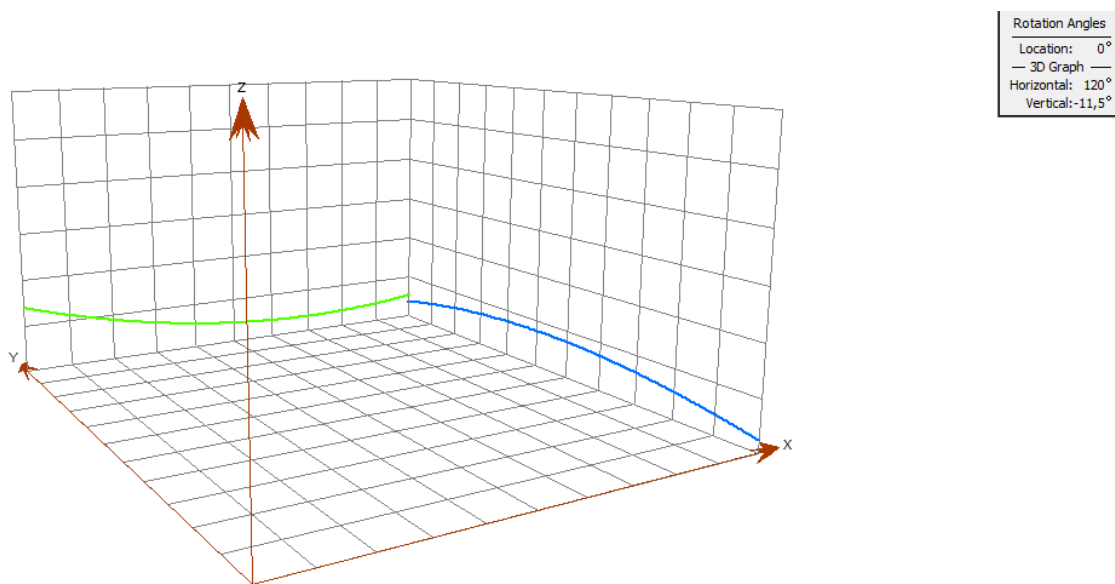
Se puede determinar que con un valor de coeficiente de variación de 97,14 los efectos causados por los valores extremos de los datos no son un problema.

Una vez aplicada la transformada logarítmica a la variable resistividad a 2 metros de profundidad la misma se encuentra normalizada con pequeñas desviaciones en sus extremos.



**Ilustración 56 - Valor normal estándar de variable resistividad a 2 metros de profundidad**

A través de la realización de un gráfico de tendencia se puede determinar el grado del polinomio y la tendencia de la muestra.

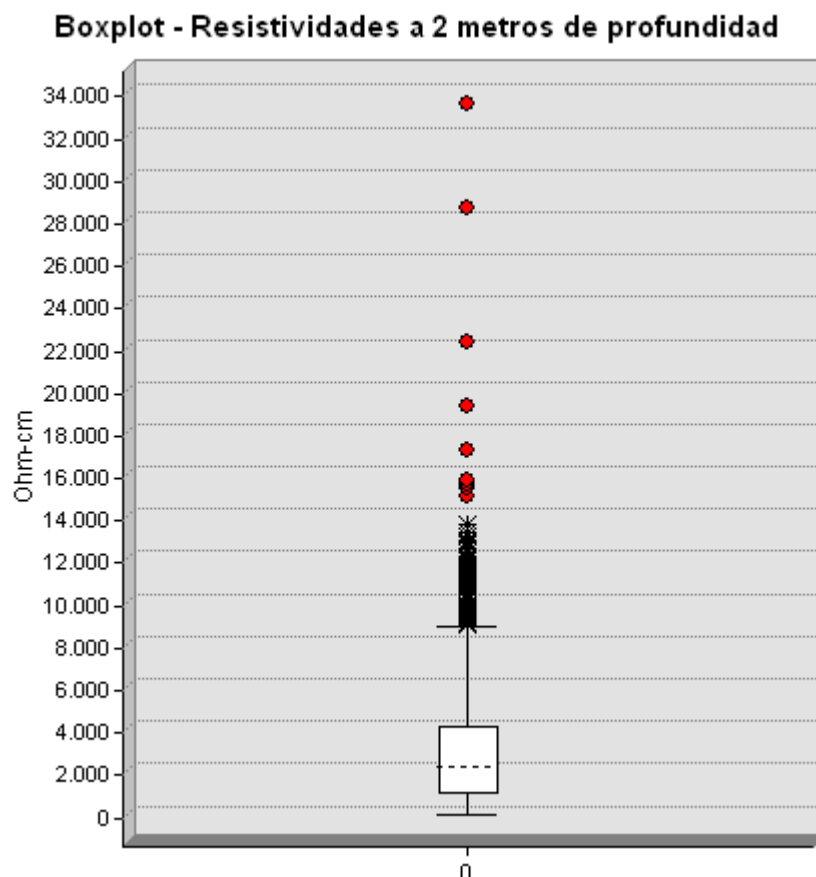


**Ilustración 57 - Gráfico de tendencia, variable "Resistividad a 2 metros de profundidad"**

Este gráfico muestra tendencias en dos direcciones: este-oeste (línea color verde) y sur-norte (línea color azul). La línea verde muestra una tendencia de aumento de los niveles de "Resistividad a 2 metros de profundidad" hacia el oeste; mientras que la línea azul, muestra niveles más altos de "Resistividad a 2 metros de profundidad" en el centro del área de estudio con decaimiento en dirección norte y decaimiento (más pronunciado) en dirección sur. A manera de conclusión se dice que esta muestra tiene una tendencia que puede ser representada por un polinomio de orden 2.

A través de la utilización de un gráfico de caja se observa que al igual que la variable resistividad a 1 metro de profundidad también hay una gran cantidad de valores atípicos (outliers) los cuales deben ser tratados y analizados a los fines de poder determinar la razón de los mismos.

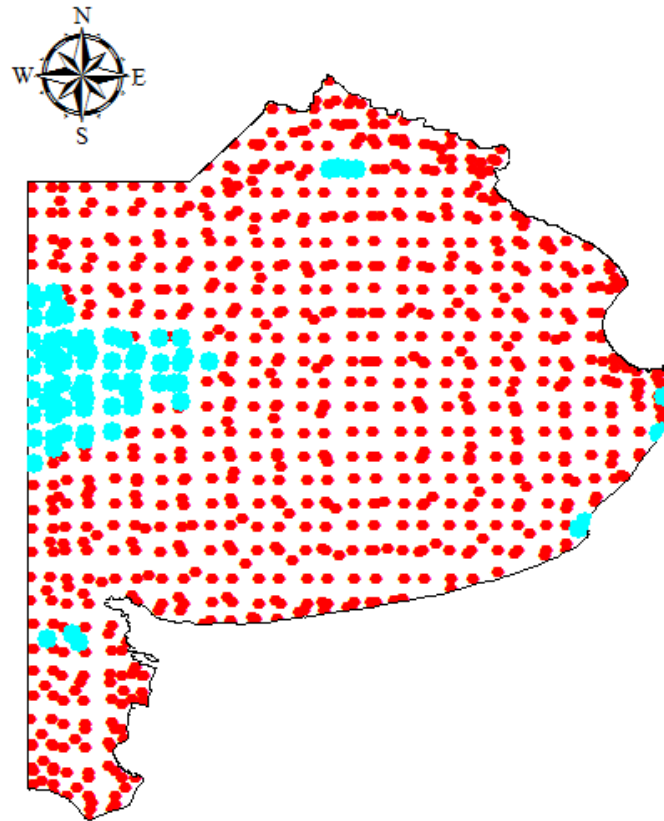
### Valores atípicos - (R2)



**Ilustración 58 – Boxplot, variable "Resistividad a 2 metros de profundidad"**

A través de la utilización de un gráfico de caja se observa que hay una gran cantidad de valores atípicos (outliers) los cuales deben ser tratados y analizados a los fines de poder determinar la razón de los mismos.

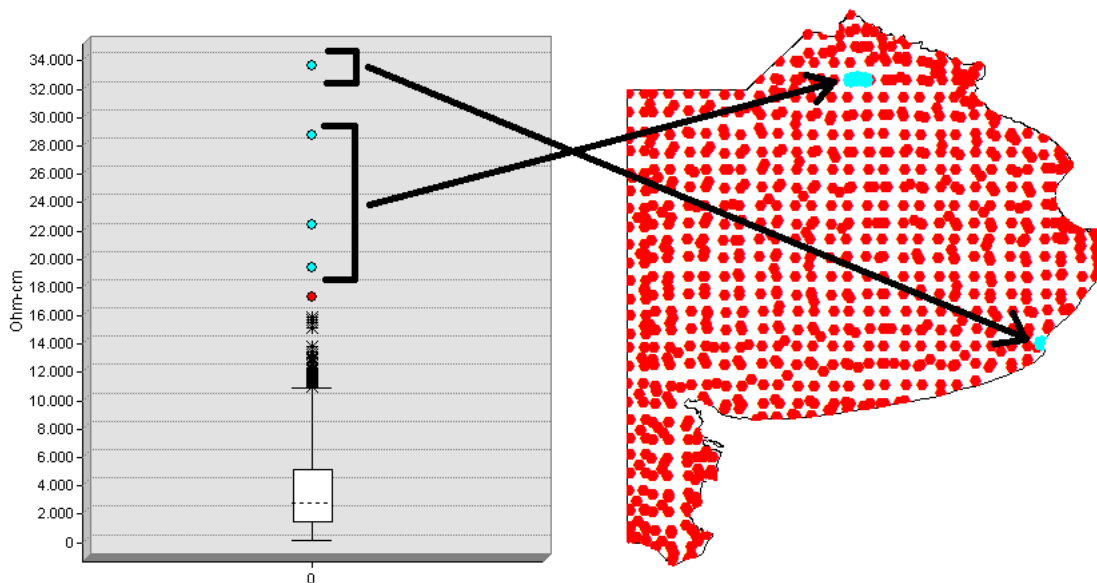
Se procedió a seleccionar todos los valores atípicos por fuera del gráfico de cajas e identificar la ubicación geográfica a la cual pertenecen tal como se observa en la Ilustración 59.



**Ilustración 59 - Valores atípicos Resistividad a 2 metros de profundidad**

Al tener identificados todos los valores atípicos se procedió a identificar los valores extremos y determinar su ubicación a fin de poder realizar un análisis específico de los mismos.

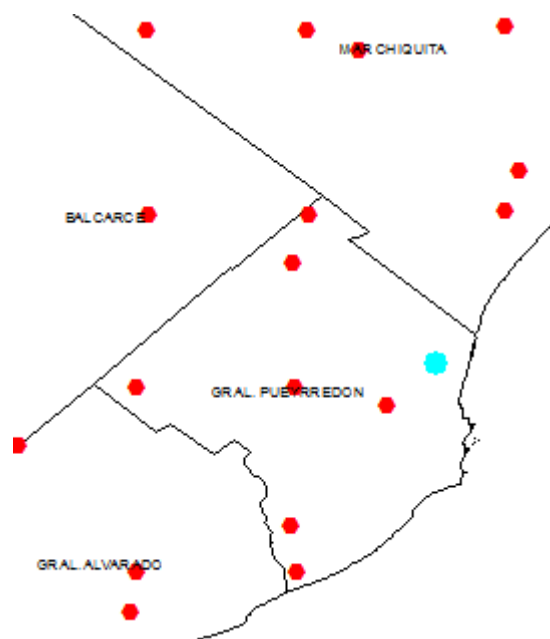




**Ilustración 60 – Geolocalización de valores atípicos variable "Resistividad a 2 metros de profundidad"**

Para el análisis de valores atípicos se determinó que aquellas muestras similares aglomeradas en zonas cercanas, son correspondientes a sectores del suelo de la provincia de Buenos Aires con algún tipo de disparidad respecto a la media de la provincia y cuando una de las muestras toma valores significativamente diferentes a las de la zona de medición se procedió a efectuar reiteradas mediciones en lugares aledaños para poder determinar que es lo que sucede en dicho lugar.

En el partido de General Pueyrredon, situado al sudeste de la provincia, limitado al norte por los partidos de Mar Chiquita y Balcarce se encontró un valor atípico extremo como se puede observar en la Ilustración 61 y por tal motivo se procedió a realizar un relevamiento más específico.



**Ilustración 61 - Valor extremo de variable "Resistividad a 2 metros de profundidad" localizado en el partido de General Pueyrredon**



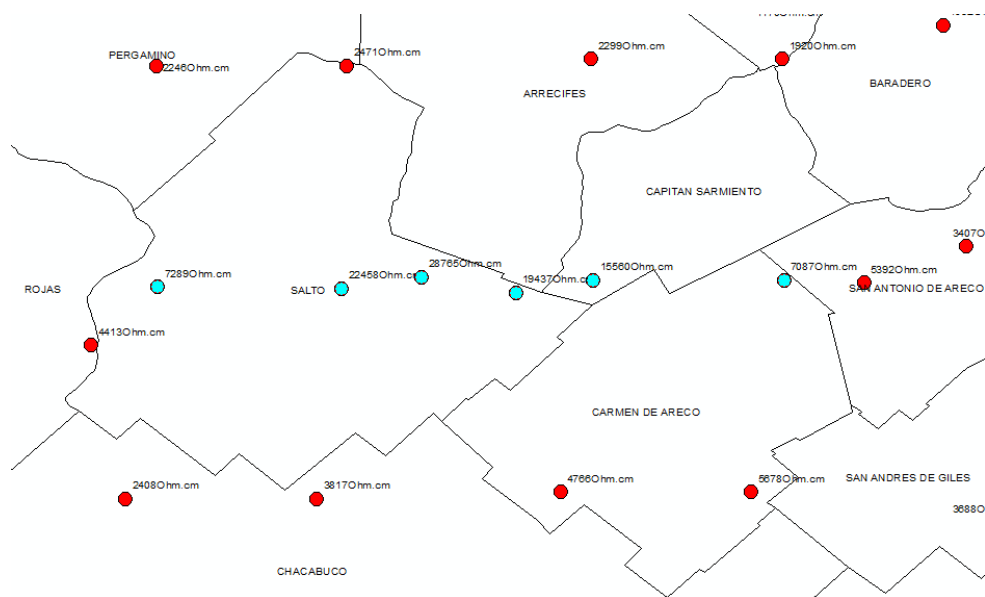
**Ilustración 62 - Imagen satelital de valores extremos de variable "Resistividad a 2 metros de profundidad" localizado en ingreso al Aeropuerto Internacional Ástor Piazzolla - Fuente: Google Earth**



**Ilustración 63 - Ingreso Aeropuerto Internacional Ástor Piazzolla, zona de relevamiento de valor atípico extremo - Fuente: Google street view**

En el partido de General Pueyrredon se encontró un valor atípico extremo el cual no mantenía relación alguna con los valores aledaños medidos, ni con los valores conocidos en base a otras experiencias de campo. Aprovechando la precisión del GPS utilizado para el almacenamiento de los datos de relevamiento, se volvió al lugar exacto para tomar una nueva medición la cual si se correspondió con los valores medidos en ubicaciones cercanas, lo que motivo a eliminar la muestra original de esa locación.

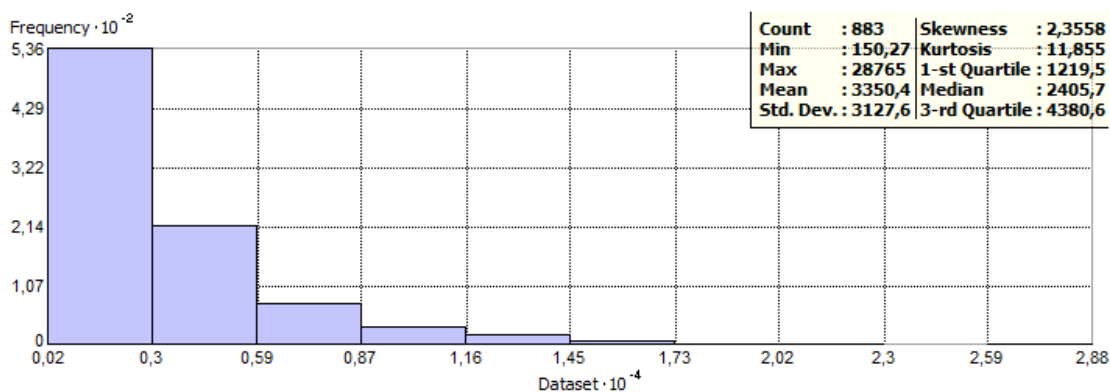
En los partidos de Salto, Capitán Sarmiento y Carmen de Areco se encontraron valores extremos los cuales mantienen relación entre sí según se puede observar en la Ilustración 64.



**Ilustración 64 - Valores extremos de variable "Resistividad a 2 metros de profundidad" localizados en los partidos de Salto, Capitán Sarmiento y Carmen de Areco**

Esta zona se caracteriza por tener suelos según la escala de Soil Taxonomy del tipo Molisoles (suelos negros o pardos que se desarrollaron a partir de sedimentos minerales en climas templados húmedos a semiáridos, pero también, pueden presentarse en regímenes fríos y cálidos, con una vegetación mayormente conformada por gramíneas). Los valores extremos fueron encontrados en lugares de actividad agrícola, por lo que dicha zona podría llegar a estar influenciada por la utilización de algún tipo de fertilizante, pero evidentemente son valores característicos de esta área geográfica.

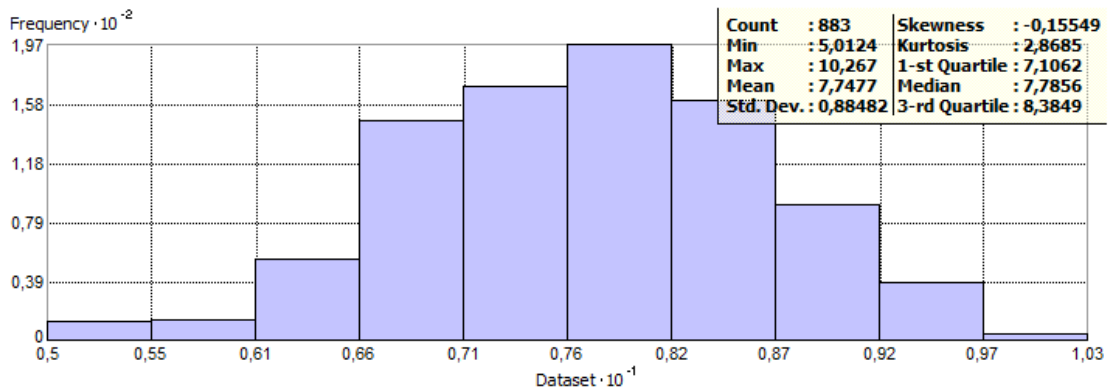
Finalmente se volvió a calcular la estadística básica sin contemplar el punto de muestreo ubicado en el partido de General Pueyrredon.



**Ilustración 65 – Histograma, variable "Resistividad a 2 metros de profundidad" sin valor atípico extremo**

El coeficiente de sesgo de la muestra recolectada para la variable "Resistividad a 2 metros de profundidad" es de 2,35.

La distribución de la variable "Resistividad a 2 metros de profundidad" es del tipo leptocúrtica y asimétrica positiva, por lo tanto es necesario aplicar una transformación del tipo logarítmica, para obtener una distribución normal de la muestra.



**Ilustración 66 – Histograma, variable "Resistividad a 1 metro de profundidad con transformación logarítmica" sin valor atípico extremo**

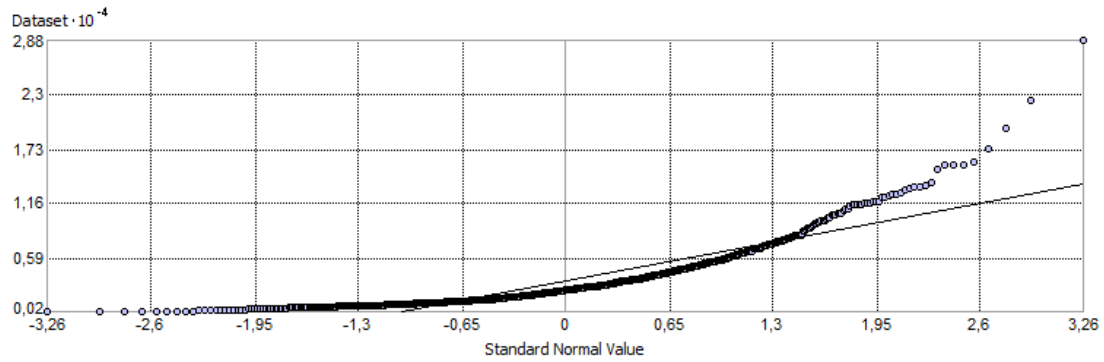
Coeficiente de variación sin valor atípico extremo - (R2)

$$CV_{R2} = \left( \frac{3127,60}{3350,40} \right) * 100$$

$$CV_{R2} = 93,35$$

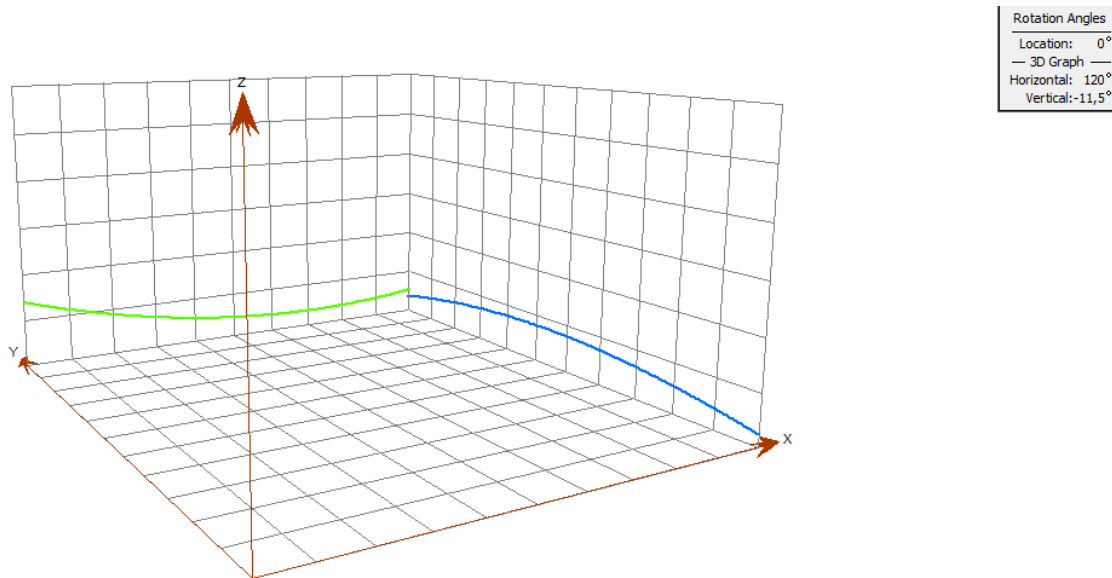
Se puede determinar que con un valor de coeficiente de variación de 93,35 los efectos causados por los valores extremos de los datos no son un problema.

Una vez aplicada la transformada logarítmica a la variable "Resistividad a 2 metros de profundidad" la misma se encuentra normalizada con pequeñas desviaciones en sus extremos.



**Ilustración 67 - Valor normal estándar de variable "Resistividad a 2 metros de profundidad" sin valor atípico extremo**

A través de la realización de un gráfico de tendencia se puede determinar el grado del polinomio y la tendencia de la muestra.



**Ilustración 68 - Gráfico de tendencia, variable "Resistividad a 2 metros de profundidad" sin valor atípico extremo**

Este gráfico muestra tendencias en dos direcciones: este-oeste (línea color verde) y sur-norte (línea color azul). La línea verde muestra una tendencia de aumento de los niveles de "Resistividad a 2 metros de profundidad" hacia el oeste; mientras que la línea azul, muestra niveles más altos de "Resistividad a 2 metros de profundidad" en el centro del área de estudio con decaimiento en dirección norte y decaimiento (más pronunciado) en dirección sur. A manera de conclusión se dice que esta muestra tiene una tendencia que puede ser representada por un polinomio de orden 2.

Como conclusión del análisis exploratorio para la variable "Resistividad a 2 metros de profundidad" y que se debe tener en cuenta durante la realización del análisis estructural de los datos, se obtuvo:

- Los datos originales no siguen una distribución normal, por lo tanto se debe aplicar una transformación logarítmica.
- La tendencia es de segundo orden.
- Fue eliminado un valor atípico ubicado en el partido de General Pueyrredon.

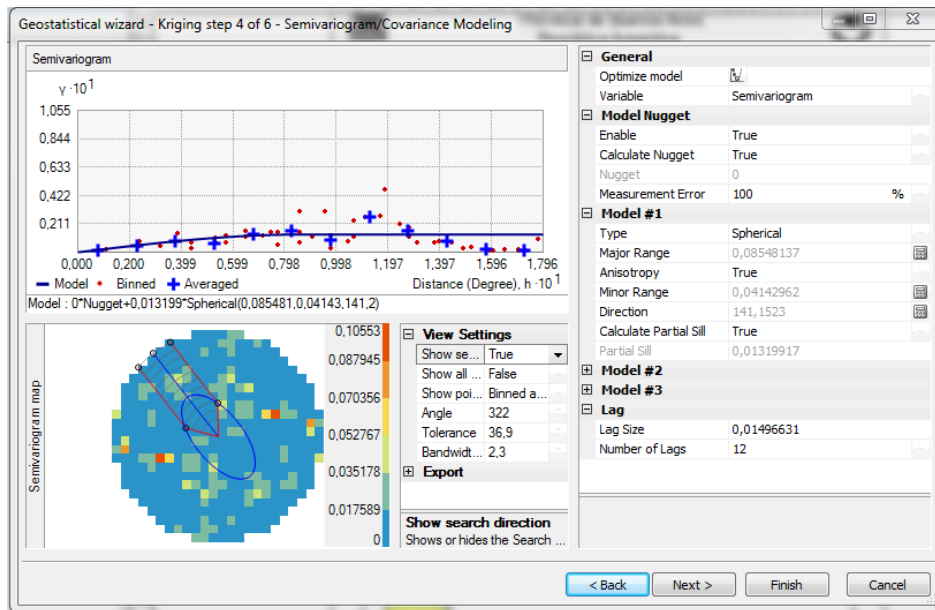
## Análisis estructural de los datos - (R2)

Una vez que se identificó la tendencia de los datos, la distribución de la muestra y se evaluaron los valores atípicos, el siguiente paso es el análisis estructural y realización del modelo geoestadístico. Para llevarlo adelante se utilizó el módulo Geostatistical Analyst de Arcmap. El método de interpolación seleccionado para el análisis de los datos fue el Kriging Ordinario, el tipo de transformada logarítmica y el orden de la tendencia que como se vio anteriormente es cuadrática (segundo orden).

Se utilizó el modelo esférico para ajustar el semivariograma, buscando la curva que mejor se adapte al promedio de la muestra. Cada punto del semivariograma corresponde a la media de los valores de variabilidad de todos los puntos agrupados en cada pixel de la superficie de tendencia.

Para encontrar un número apropiado de lags (segmentos), se ensayaron varios valores, identificando que un valor de 12 es un número apropiado para estos datos, pues se observó que cuando el número de lags es mayor que 12, los valores estimados se alejan de la media, y cuando el número de lags es menor que 12, se generan valores estimados que, al graficarlos, generan círculos sobre los puntos con valores conocidos. El lag size (valor promedio de distancia entre los puntos muestreados) fue determinado por el mismo software como la mejor opción.

Se observa en el mapa del semivariograma que la muestra varía más rápido en el sentido Noreste-Suroeste. Debido a que la correlación entre los datos depende de la dirección en la que esta se calcule se dice que hay anisotropía. Por tal motivo fue necesario activar la función de anisotropía, lo que permitió visualizar la elipse de tendencia y se determinó utilizar un Angulo de  $322^{\circ}$  con un ancho de banda de 2.3 para disminuir la presencia de algunos datos consideramos como atípicos "outliers".



**Ilustración 69 - Geostatistical Wizard: Semivariograma, variable "Resistividad a 2 metros de profundidad"**

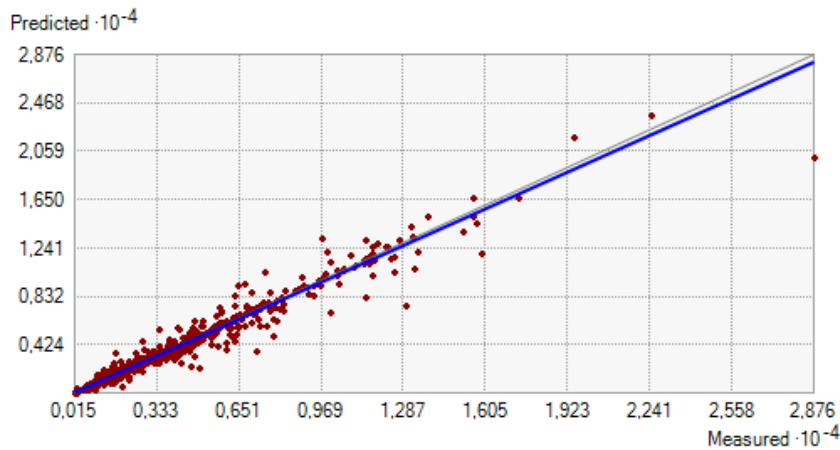
Finalmente se obtiene un cálculo recomendado por el software ya corregido en función de los parámetros de anisotropía y pesos asignados para cada muestra, procesando la interpolación final con un máximo de 100 vecinos, un mínimo de 20 y 1 sector de búsqueda de muestras para interpolación.

<b>Muestras</b>	883 de 883
<b>Mean</b>	-20,29
<b>Root-Mean-Square</b>	657,53
<b>Men Standardized</b>	-0,1280344
<b>Root-Mean-Square Standardized</b>	1,933245
<b>Average Standard Error</b>	386,1206

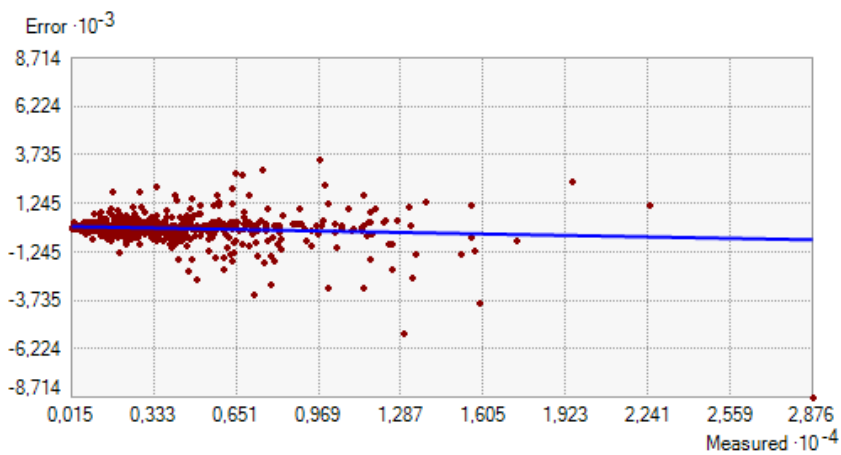
**Tabla 6 - Cálculo de error y recta de regresión variable "Resistividad a 2 metros de profundidad"**

El software brinda la posibilidad de realizar una validación cruzada, a través de un algoritmo opera omitiendo un dato conocido, luego tomando los datos restantes estima el dato descartado y compara el valor del resultado estimado con el valor que inicialmente se tenía de él. De manera secuencial se procede con todos los demás datos. Los resultados se muestran en una gráfica en la cual la abscisa representa los datos conocidos, *Measured*, y la ordenada los datos estimados, *Predicted*.



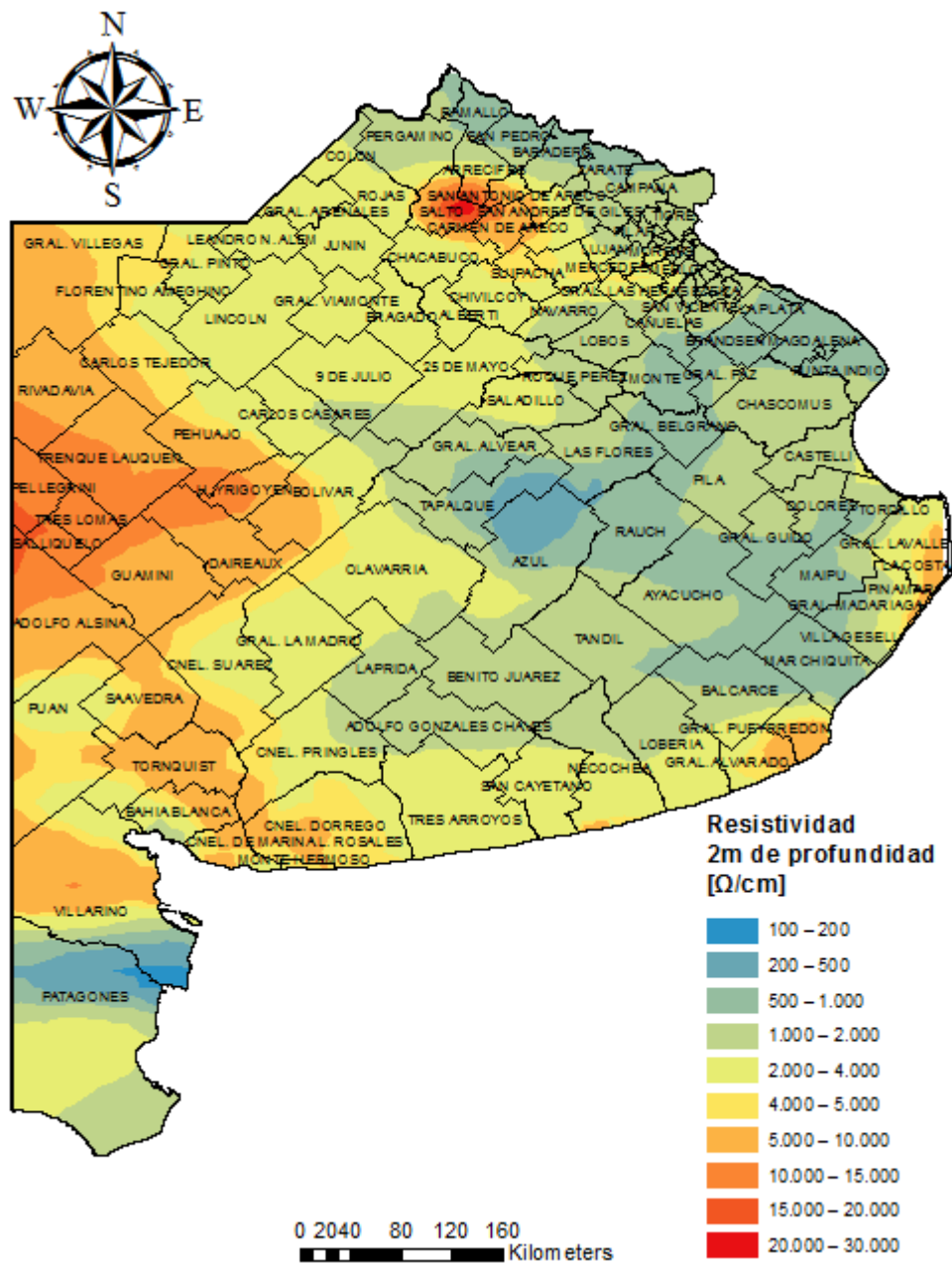


**Ilustración 70 - Gráfico de valores medidos vs predicción, variable "Resistividad a 2 metros de profundidad"**



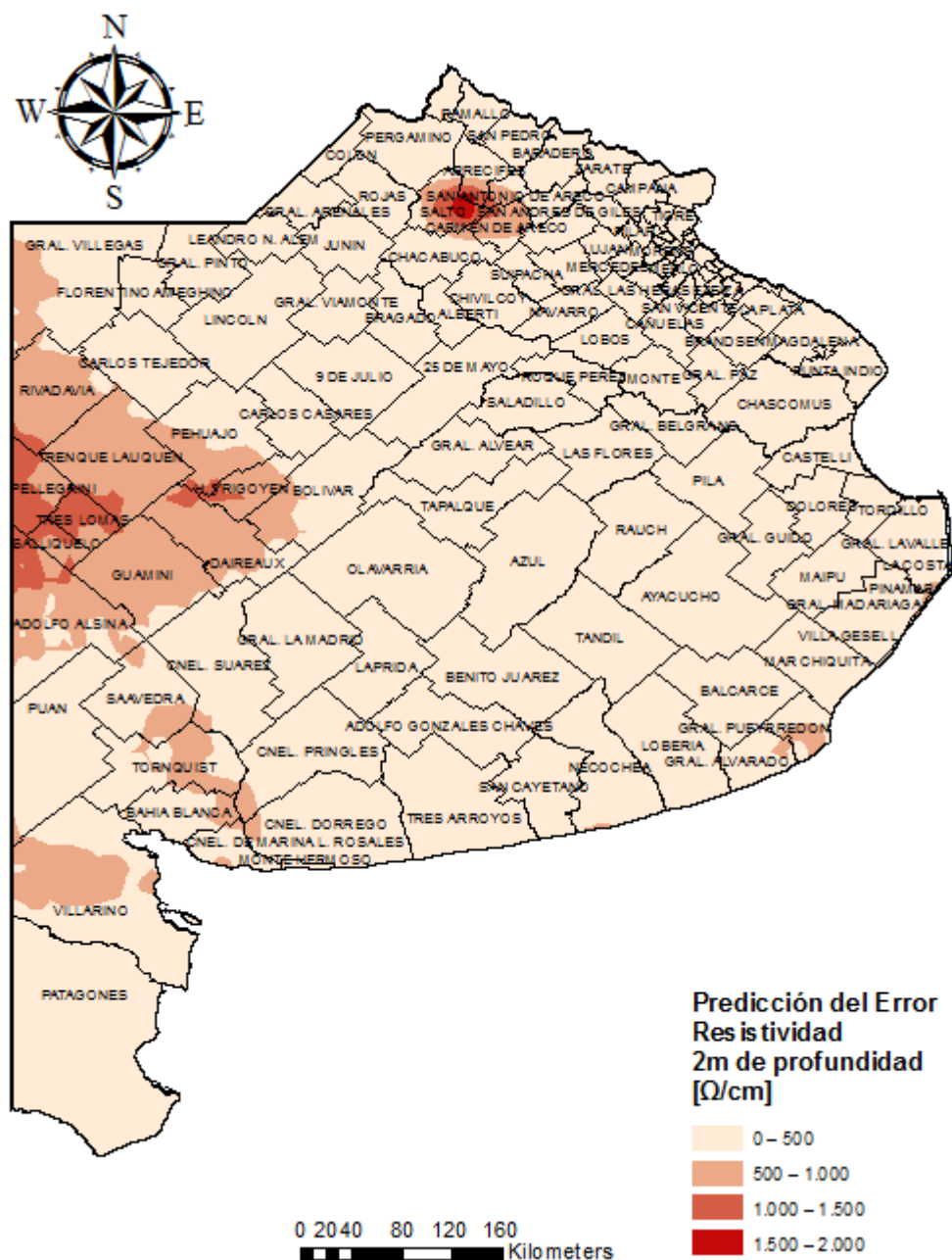
**Ilustración 71 - Gráfico de valores medidos vs error, variable "Resistividad a 2 metros de profundidad"**

Como se observa en la Ilustración 70, y en la Ilustración 71, los valores prededidos por el método de interpolación Kriging ordinario en relación a los medidos, comienzan a dispersarse a medida que aumentan las resistividades a 2 metros de profundidad relevadas en campo. Esto se debe principalmente a que como se vio anteriormente existen determinadas zonas con suelos característicos y altamente resistivos, que al ser contrastados contra la media de la provincia generan estas grandes diferencias. Manteniendo el error dentro de este umbral (error estándar promedio de 386  $\Omega/cm$ ) no sería perjudicial para la creación y utilización del mapa de resistividades a 2 metros de profundidad. Pero buscando mejorar la fiabilidad del mismo es menester crear un mapa del error para poder determinar las zonas donde pueda llegar a ser necesario realizar algún estudio adicional. Finalmente se presenta el mapa correspondiente a la provincia de Buenos Aires interpolado por el método Kriging Ordinario, correspondiente a la variable "Resistividad a 2 metros de profundidad".



**Ilustración 72 - Mapa de resistividad a 2 metros de profundidad de la Provincia de Buenos Aires**

A su vez es presentado el mapa de estimación de error correspondiente a la variable "Resistividad a 2 metros de profundidad".

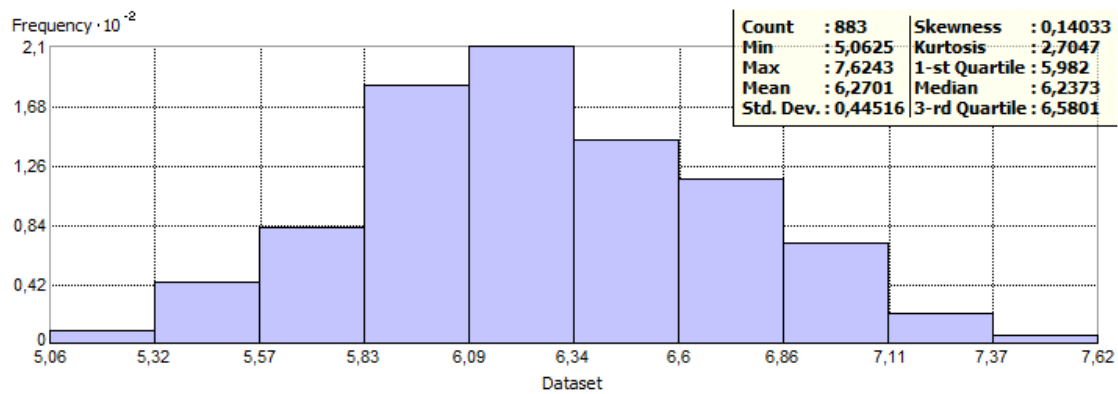


**Ilustración 73 - Predicción del error de resistividad a 2 metros de profundidad de la Provincia de Buenos Aires**

# pH

## Análisis exploratorio

### Determinación de la normalidad de la muestra – (pH)



**Ilustración 74 - Histograma, variable "pH"**

El coeficiente de sesgo de la muestra recolectada para la variable "pH" es de 0,14 y el coeficiente de Kurtosis es 2,70, se puede definir como una distribución de tipo normal platicúrtica, por lo tanto no es necesario aplicar una transformación de ningún tipo.

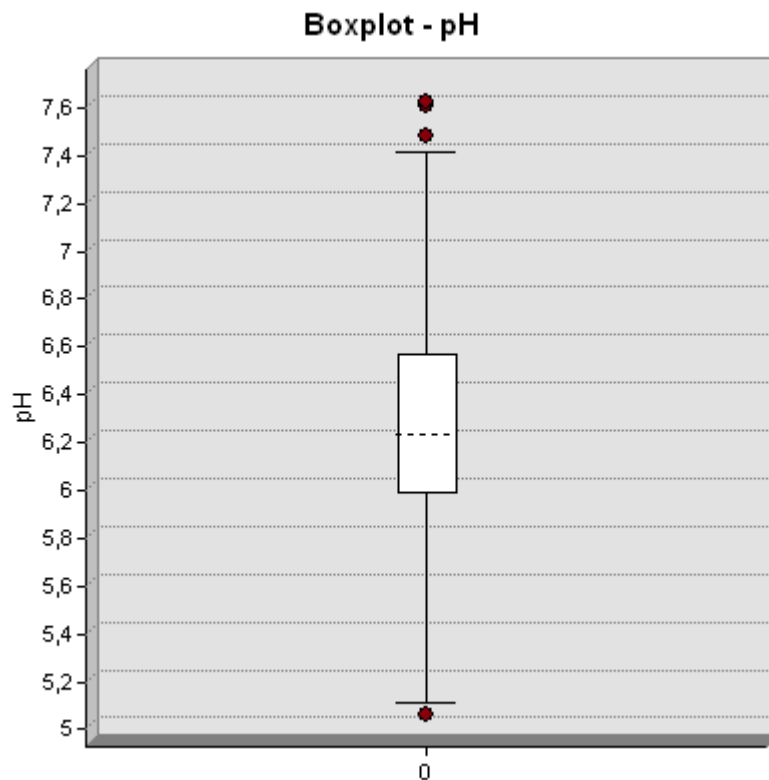
### Coefficiente de variación – (pH)

$$CV_{pH} = \left( \frac{0,44516}{6,2701} \right) * 100$$

$$CV_{pH} = 7,09$$

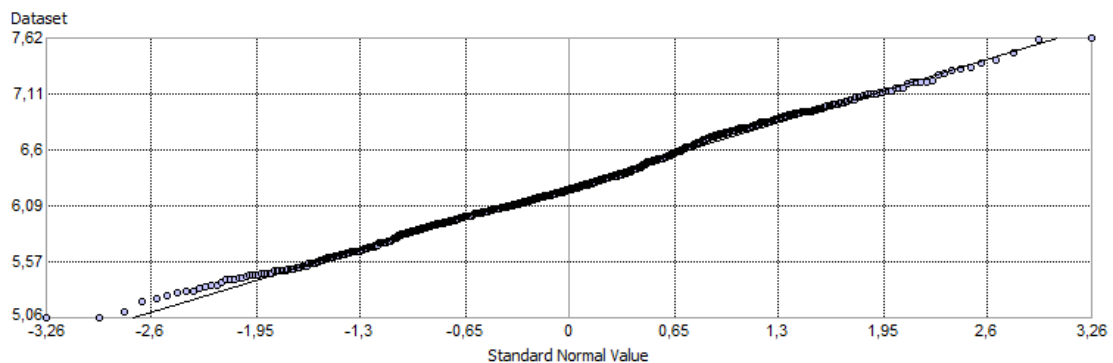
Se puede determinar que con un valor de coeficiente de variación de 7,09 los efectos causados por los valores extremos de los datos no son un problema.

## Valores atípicos – (pH)



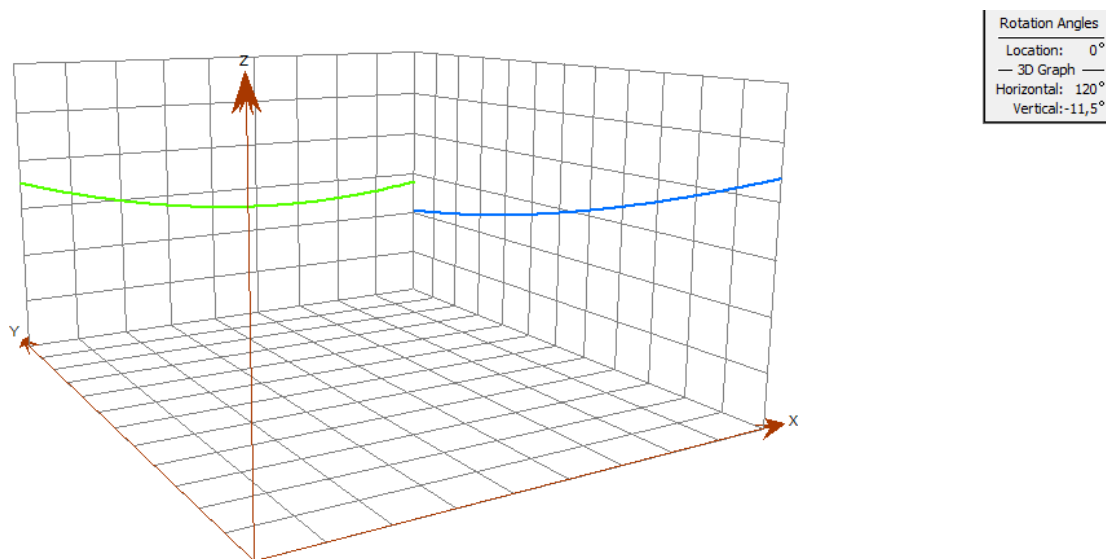
**Ilustración 75 – Boxplot, variable "pH"**

Los valores atípicos encontrados durante el muestreo de pH, son valores completamente normales a la superficie de la provincia de Buenos Aires como se observa en la Ilustración 76.



**Ilustración 76 - Valor normal estándar de variable pH**

A través de la realización de un gráfico de tendencia se puede determinar el grado del polinomio y la tendencia de la muestra.



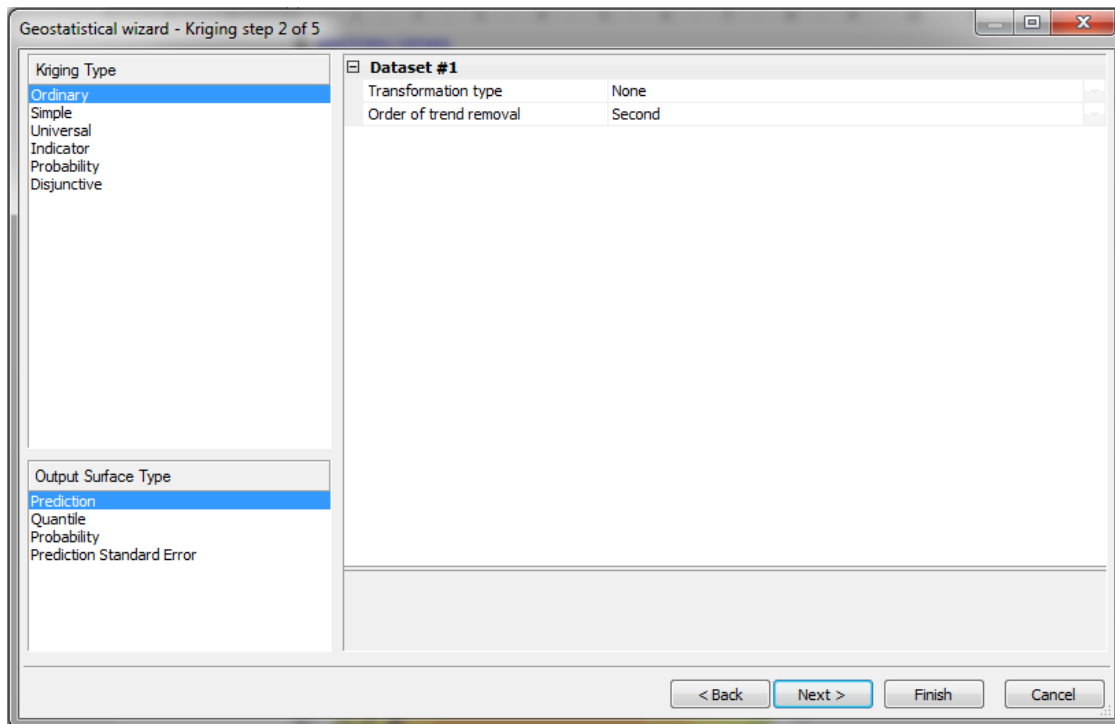
**Ilustración 77 - Gráfico de tendencia, variable "pH"**

Este gráfico muestra tendencias en dos direcciones: este-oeste (línea color verde) y sur-norte (línea color azul). La línea verde muestra una tendencia de aumento de los niveles de "pH" hacia el oeste; mientras que la línea azul, muestra niveles más altos de "pH" en el sur del área de estudio con decaimiento en dirección. A manera de conclusión se dice que esta muestra tiene una tendencia que puede ser representada por un polinomio de orden 2.

### Análisis estructural de los datos – (pH)

Una vez que se identificó la tendencia de los datos, la distribución de la muestra y se evaluaron los valores atípicos, el siguiente paso es el análisis estructural y realización del modelo geostatístico. Para llevarlo adelante se utilizó el módulo Geostatistical Analyst de Arcmap. El método seleccionado para el análisis de los datos fue el Kriging Ordinario.

A diferencia de las variables "Resistividad a 1 metro" y "Resistividad a 2 metros" para la realización del método Kriging Ordinario no es necesario aplicar ningún tipo de transformada ya que la muestra sigue una distribución normal, con una tendencia de segundo orden.

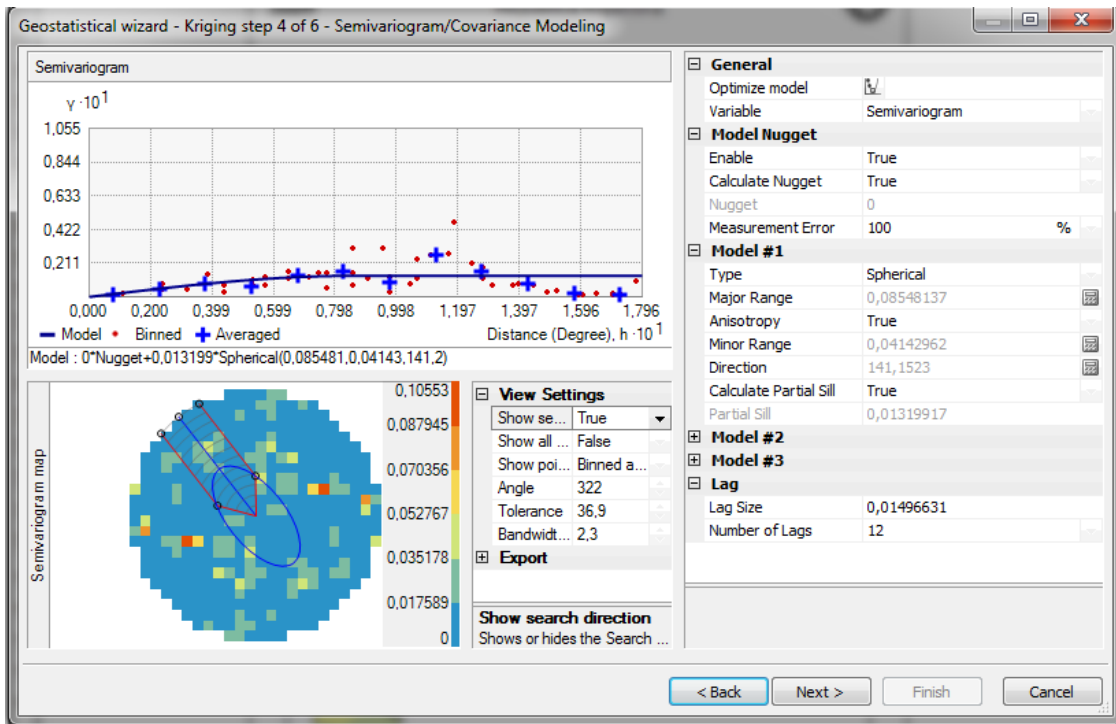


**Ilustración 78 - Geostatistical Wizard: Kriging, tipo de transformación y orden de la tendencia, variable "pH"**

En el cuadro de dialogo siguiente se afina el modelo del semivariograma a ajustar, para este análisis en particular se seleccionó el tipo de modelo esférico, buscando la curva que mejor se adapte al promedio de la muestra. Cada punto del semivariograma corresponde a la media de los valores de variabilidad de todos los puntos agrupados en cada pixel de la superficie de tendencia.

Para encontrar un número apropiado de lags (segmentos), se ensayaron varios valores, identificando que un valor de 12 es un número apropiado para estos datos, pues se observó que cuando el número de lags es mayor que 12, los valores estimados se alejan de la media, y cuando el número de lags es menor que 12, se generan valores estimados que, al graficarlos, generan círculos sobre los puntos con valores conocidos. El lag size (valor promedio de distancia entre los puntos muestreados) fue determinado por el mismo software como la mejor opción.

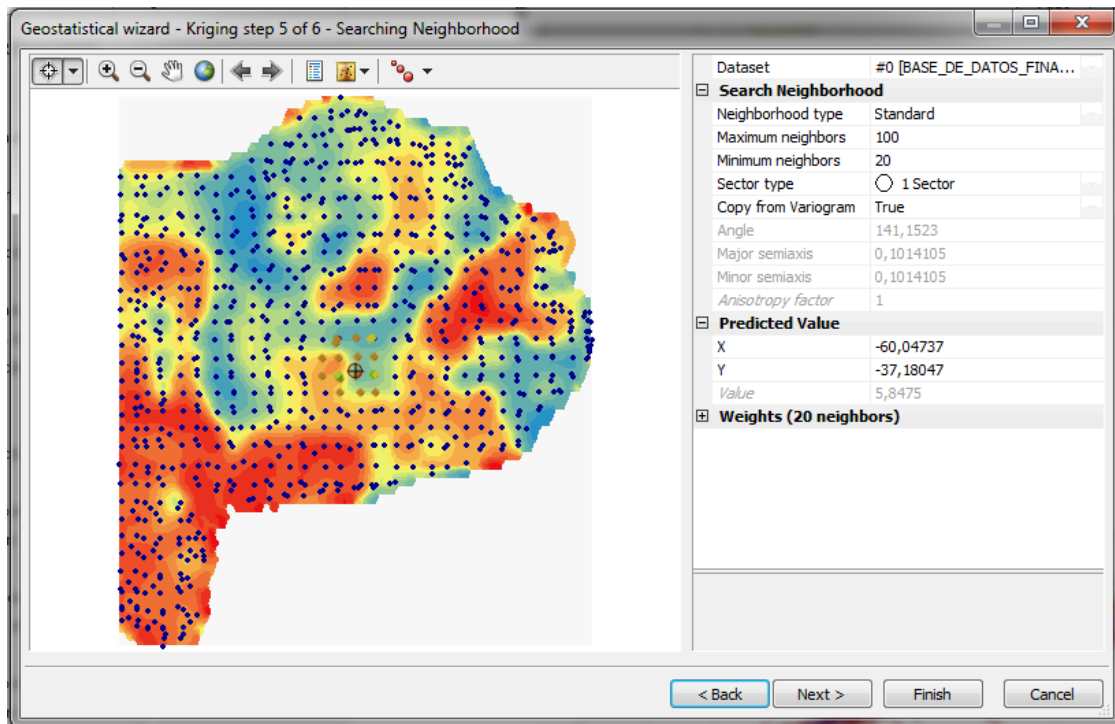
Se observa en el mapa del semivariograma que la muestra varia más rápido en el sentido Noreste-Suroeste. Debido a que la correlación entre los datos depende de la dirección en la que esta se calcule se dice que hay anisotropía. Por tal motivo fue necesario activar la función de anisotropía, lo que permitió visualizar la elipse de tendencia y se determinó utilizar un Angulo de 322° con un ancho de banda de 2.3 para disminuir la presencia de algunos datos consideramos como atípicos "outliers".



**Ilustración 79 - Geostatistical Wizard: Semivariograma, variable "pH"**

Finalmente se obtiene un cálculo recomendado por el software ya corregido en función de los parámetros de anisotropía y pesos asignados para cada muestra, procesando la interpolación final con un máximo de 100 vecinos, un mínimo de 20 y 1 sector de búsqueda de muestras para interpolación.



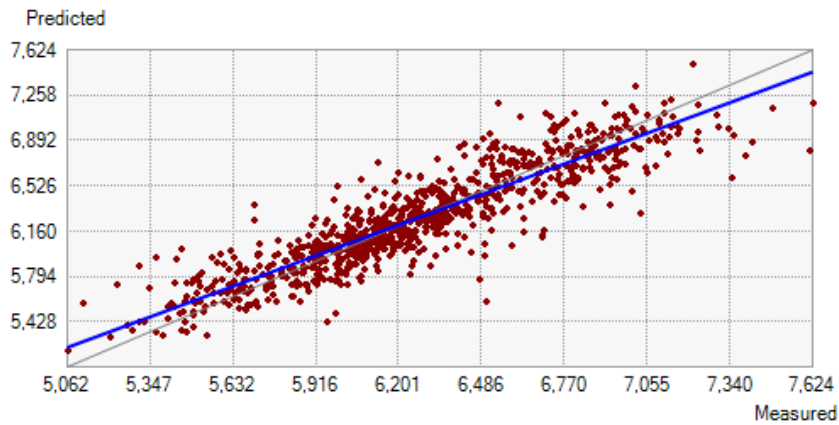


**Ilustración 80 - Geostatistical Wizard: Selección de vecinos y formato de sector de búsqueda, variable "pH"**

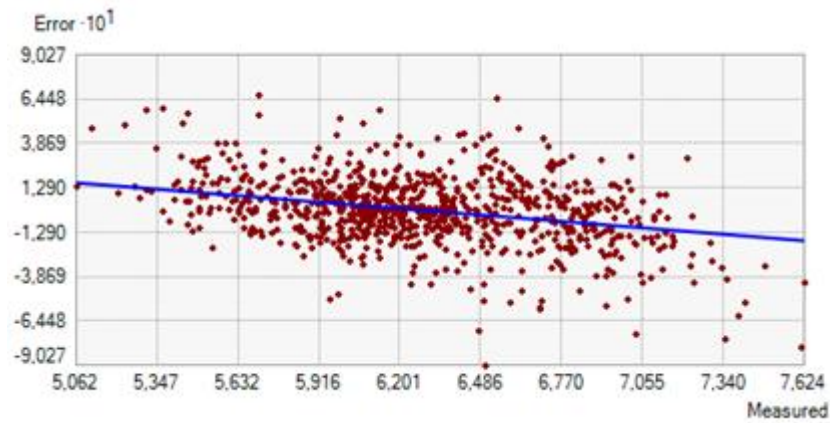
<b>Muestras</b>	883 de 883
<b>Mean</b>	0,002659333
<b>Root-Mean-Square</b>	0,1945541
<b>Men Standardized</b>	0,02222263
<b>Root-Mean-Square Standardized</b>	1,660411
<b>Average Standard Error</b>	0,1158605

**Tabla 7 - Cálculo de error "pH"**

El software brinda la posibilidad de realizar una validación cruzada, a través de un algoritmo opera omitiendo un dato conocido, luego tomando los datos restantes estima el dato descartado y compara el valor del resultado estimado con el valor que inicialmente se tenía de él. De manera secuencial se procede con todos los demás datos. Los resultados se muestran en una gráfica en la cual la abscisa representa los datos conocidos, *Measured*, y la ordenada los datos estimados, *Predicted*.

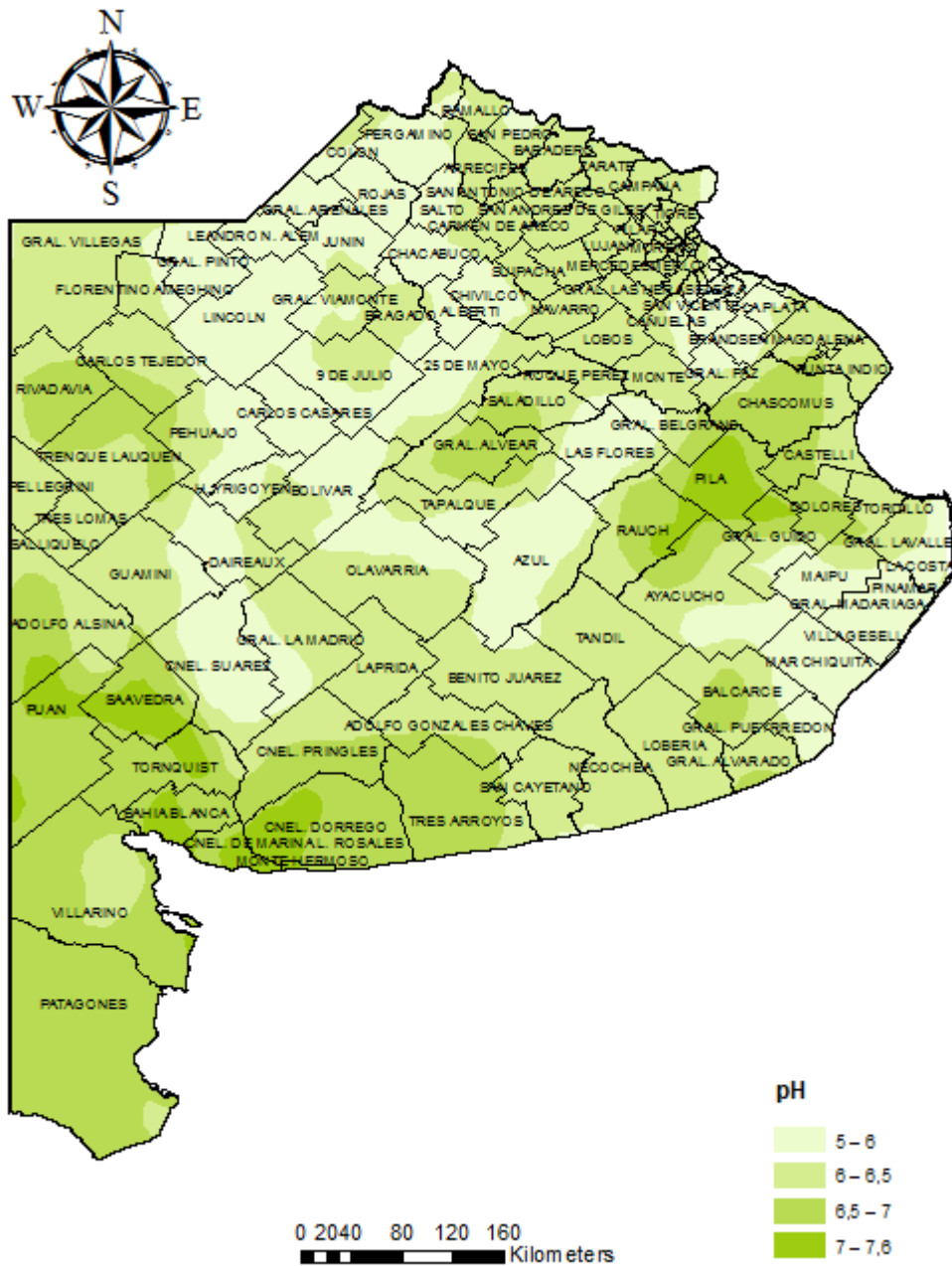


**Ilustración 81 - Gráfico de valores medidos vs predicción, variable "pH"**



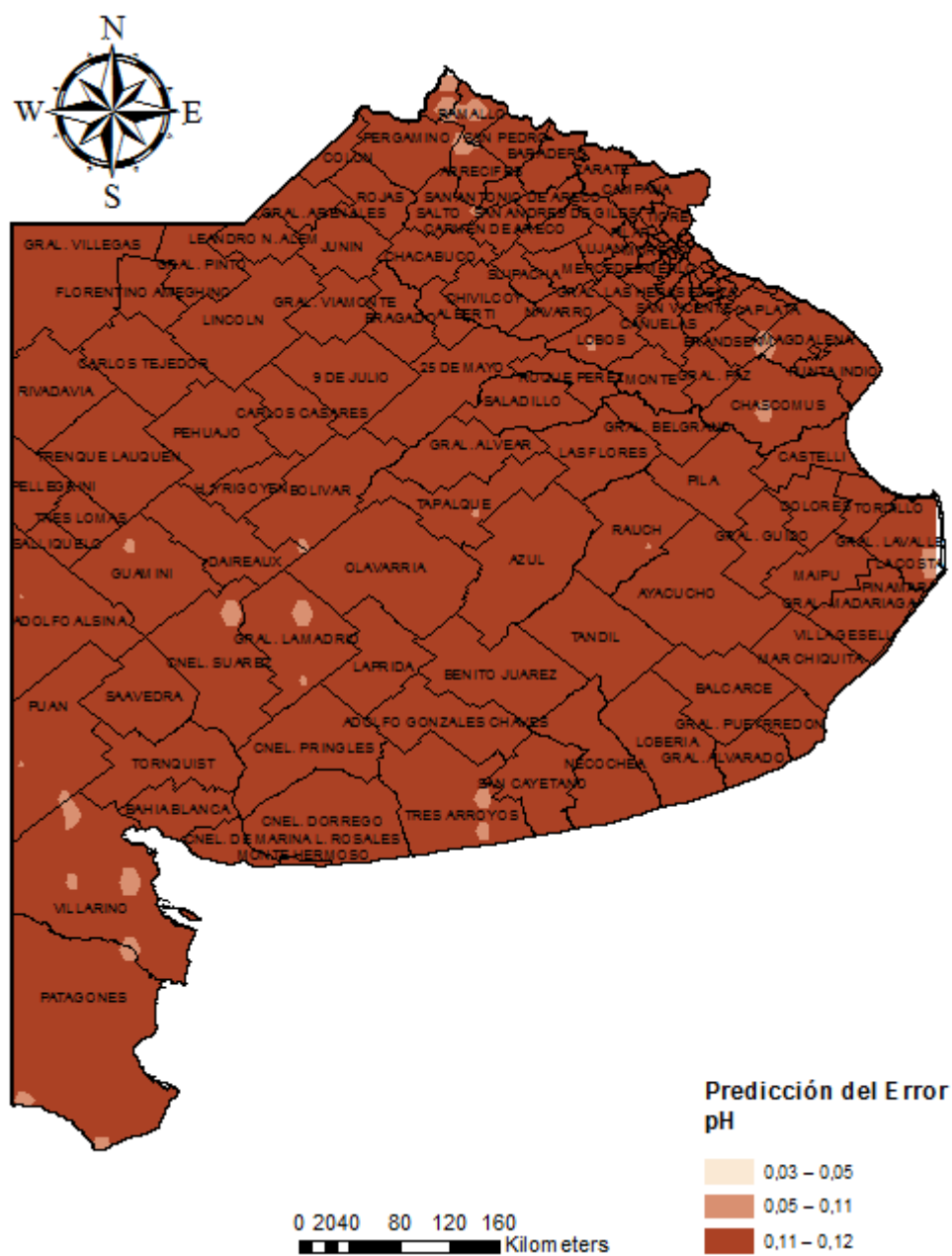
**Ilustración 82 - Gráfico de valores medidos vs error, variable "pH"**

Como se observa en la Ilustración 81, y en la Ilustración 82, los valores predcidos por el método de interpolación Kriging ordinario en relación a los medidos, no tienen una variación significativa. Esto se debe principalmente a que la provincia de Buenos Aires mantiene niveles de pH similares a lo largo de toda su extensión. Buscando mejorar la fiabilidad del mapa es necesario crear un mapa de estimación del error para poder determinar las zonas donde pueda llegar a ser necesario realizar algún estudio adicional. Finalmente se presenta el mapa correspondiente a la provincia de Buenos Aires interpolado por el método Kriging Ordinario, correspondiente a la variable "pH".



**Ilustración 83 - Mapa de pH de la Provincia de Buenos Aires**

A su vez es presentado el mapa de estimación de error correspondiente a la variable "pH".



**Ilustración 84 - Predicción del error del pH de la Provincia de Buenos Aires**

# Conclusión

Esta investigación nació como un proyecto de desarrollo y transferencia tecnológica a partir del problema que enfrenta una empresa aledaña a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora, a la hora de realizar la ingeniería básica de un sistema de protección catódica, referido particularmente a la confección de presupuestos.

Esta empresa al momento de realizar los cálculos a fin de definir la cantidad de material galvánico a instalar para poder elaborar un presupuesto, se encuentra que los propietarios de los ductos disponen de todas las características técnicas de las instalaciones a proteger, pero no así del suelo que las rodea. Sin embargo y ante la negativa habitual de contratar un servicio de estudios complementarios en campo para poder confeccionar un presupuesto lo más ajustado posible, se torna necesario poder conocer a priori el pH y las resistividades aproximadas del terreno a profundidades de 1 y 2 metros para poder salvar esta situación.

Por tal motivo y a fin de aportar conocimiento en este campo, surgieron las siguientes preguntas de investigación:

¿Existe alguna relación entre la resistividad del terreno y profundidad? De existir dicha relación ¿Existe alguna regularidad en la misma?

¿Existe relación entre la resistividad y la ubicación geográfica?

¿La variación del pH en la provincia de Buenos Aires influye en la confección de ingeniería básica para el diseño de sistemas de protección catódica?

Estas preguntas iniciales vinculadas al problema de investigación, son las que dieron lugar a la formulación de la hipótesis de trabajo:

*"El proceso de decisión sobre la instalación de distintos sistemas de protección catódica se ve influenciado por la resistividad del terreno (propiedades eléctricas), su profundidad, pH (propiedades químicas) y su ubicación geográfica."*

Durante el desarrollo del trabajo, considero que se ha conseguido dar respuesta a las preguntas de investigación, precedentemente enunciadas por lo que se está en condiciones de concluir que, la resistividad del suelo (propiedad que tiene para conducir electricidad), varía ampliamente a lo largo y ancho de toda la superficie relevada, estando directamente relacionada con su ubicación geográfica. En este sentido, se identificó que a mayor profundidad las resistividades, - en línea general, - suelen ser más bajas, con una media de

3384  $\Omega/\text{cm}$  para resistividades a 2 metros de profundidad y 3833  $\Omega/\text{cm}$  para resistividades a 1 metro de profundidad. Por lo que, a priori, se podría concluir que al momento de elaborar un presupuesto para la instalación de un sistema de protección catódica, la primera aproximación conveniente, es considerar, que la realización de dicha instalación, debería ubicarse a 2 metros de profundidad.

A partir de que la disminución del pH repercute en un aumento de densidad de corriente de intercambio y resulta en un desplazamiento del potencial de equilibrio de los cátodos de la estructura en la dirección más noble y luego de haber relevado la totalidad de la provincia de Buenos Aires y los valores obtenidos son similares en toda su extensión, con un valor medio medido de 6,2 por lo que se determinó que la medición del pH funcionará no como una variable, sino como una constante a la hora del desarrollo de ingeniería básica de sistemas de protección catódica a los fines de elaborar presupuestos.

El método geostatístico utilizado para el procesamiento de los datos fue el Kriging ordinario demostró ser muy preciso y útil para el desarrollo de este tipo de investigación. Dicho método, junto al software Arcmap, permitieron alcanzar el objetivo propuesto, *"Modelizar la variabilidad espacial de las propiedades eléctricas y químicas del suelo a diferentes profundidades para contribuir a generar nuevas herramientas que faciliten la toma de decisiones en el rubro de la protección catódica, disminuyendo la incertidumbre en los procesos de presupuestación de obras"*.

Finalmente y retomando la hipótesis inicial podemos concluir que se corrobora la hipótesis *"El proceso de decisión sobre la instalación de distintos sistemas de protección catódica se ve influenciado por la resistividad del terreno (propiedades eléctricas), su profundidad, pH (propiedades químicas) y su ubicación geográfica."* Contribuyendo al rubro de la protección catódica entregando como producto de transferencia tecnológica las cartas-mapas provinciales con patente de propiedad intelectual, como herramienta de apoyo para el diseño de sistemas de protección catódica en estructuras de acero enterradas y/o sumergidas.

## Recomendaciones

Teniendo en cuenta que, por un lado una de las condiciones necesarias para la formación de una celda de corrosión es la presencia de un electrolito, el cual es un medio conductor (solución) en el que las cargas circulan mediante el movimiento de iones. Asimismo que es condición necesaria que haya iones contaminantes, por lo que se recomienda que en futuras líneas de investigación se analice la disolución de cloruros a fin de encontrar una relación entre ellos y las resistividades del terreno.

Por otro lado sería beneficioso que se consideren los efectos que pueden generar algunos fertilizantes ya que según Liebig M. A. la frecuente aplicación de los mismos contribuye a la disminución del pH del suelo [13].

Como se vio durante el desarrollo de esta investigación, existen otros parámetros que afectan la resistividad del terreno como ser la tortuosidad, cementación, textura, resistividad aparente del agua con sales disueltas que ocupan parcialmente los poros y la temperatura, entre los cuales se podría buscar si existe alguna dependencia, de manera de ir aportando datos que permitan afinar el modelo que este trabajo presenta.

Desde otra perspectiva, se considera que el conocimiento generado a través del método utilizado para el procesamiento de los datos, podría ser utilizado para numerosos estudios que estén relacionados con una determinada ubicación geográfica.

Por último, teniendo en cuenta que existen numerosas aplicaciones, en las que las características del suelo analizadas pueden ser utilizadas, consideramos que los resultados de esta investigación, podrían ser aprovechados por otros rubros, y por ende nuevos campos de aplicación.

# Bibliografía

- [1] ISO/TC , *ISO 8044:2015 - Corrosion of metals and alloys - Basic terms and definition*, 2015.
- [2] INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY, «Electrochemical corrosion nomenclature (Recommendations 1988),» *Pure & Applied. Chemistry*, vol. 61, nº 1, pp. 19-22, 1989.
- [3] C. Raymond, *Química*, Décima ed., D.F.: Mc Graw-Hill, 2010.
- [4] A. Peabody, *Control of pipeline corrosion*, Houston, Texas: NACE International, 2001.
- [5] NACE International, *Cathodic Protection Technician*, Houston, Texas: NACE International, 2007.
- [6] NACE International, *Control of external corrosion on underground or submerged metallic piping systems*, Houston, Texas: NACE International, 2013.
- [7] NACE International, *Cathodic Protection Technologist*, Houston: NACE International, 2009.
- [8] R. A. Gummow, «Performance Efficiency of High Potential Magnesium Anodes for Cathodically,» de *Proceedings of Northern Area Eastern Conference*, Houston, 2003.
- [9] O. Ernesto, *Prospección geoelectrica en corriente continua*, Madrid: Paraninfo, 1972.
- [10] C. A. Geo, «Estudio Geofísico de Resistividad Eléctrica,» Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza – UICN, El salvador, Honduras, Guatemala, 2015.
- [11] F. Wenner, «A method of measuring earth resistivity,» *Bur. Stand. U.S. Bull*, nº 12, pp. 469-478, 1915.



- [12] H. S. Rozas, «Niveles de materia orgánica y pH en suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana argentina,» *Ciencia del suelo*, vol. 1, nº 29, pp. 29-37, 2011.
- [13] M. A. Liebig, «Crop Sequence and Nitrogen Fertilization Effects on Soil Properties in the Western Corn Belt The USDA–ARS is an equal opportunity/affirmative action employer and all agency services are available without discrimination,» *Soil Science Society of America Journal*, nº 66, pp. 596-601, 2002.
- [14] C. Nagel, «Tipos de suelos en Argentina geografía clasificación características,» 2015. [En línea]. Available: <http://historiaybiografias.com/suelo4/>. [Último acceso: 8 12 2016].
- [15] J. W. Doran y T. B. Parkin, «Defining Soil Quality for a Sustainable Environment,» *Soil Science Society of America Journal*, nº 35, pp. 3-21, 1994.
- [16] C. Malagon, C. Pulido, R. R. Llinas, B. C. Chamorro y L. J. Fernandez, *Suelos de Colombia, Santa Fé de Bogotá: IGAC*, 1995.
- [17] S. W. Buol, F. D. Hole y R. J. McCracken, *Génesis y Clasificación de Suelos, Méjico : Trillas*, 1993.
- [18] Centro de Investigaciones Territoriales y Ambientales Bonaerenses, «Suelos,» [En línea]. Available: <https://www.bancoprovincia.com.ar/citab/estadisticas/02%20MEDIO%20GEOGRAFICO/0202%20SUELOS.pdf>. [Último acceso: 10 Noviembre 2016].
- [19] Instituto Geográfico Nacional, «IGN,» [En línea]. Available: <http://www.ign.gob.ar/>. [Último acceso: 10 Noviembre 2016].
- [20] J. L. Panigatti, *Argentina 200 años, 200 suelos*, Buenos Aires: INTA, 2010.
- [21] R. Ortega y L. Flores, «Agricultura de Precisión: Introducción al manejo sitio - específico,» Ministerio de Agricultura, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, CRI Quilamapu-Chile, 1999.
- [22] P. A. Burrough, «Soil variability: a late 20th century view,» de *Soils and*

*Fertilizers*, vol. 5, 1986, pp. 529-562.

- [23] F. A. Ovalles, «Metodología para determinar la superficie representada por muestras tomadas con fines de fertilidad,» FONAIAP-CENIAP-IIAG, Maracay, 1992.
- [24] Brouder, «Applying site – specific management in Soil Fertility Research and Developing Management Information for Variable Rate Technologies. In Proceedings of Information Agriculture Conference,» Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1999.
- [25] M. Bragachini, «Agricultura de precisión para incrementar la productividad,» de *Memorias. Mar del Plata: Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa*, Mar del Plata, In 7º Congreso Nacional AAPRESID, 1999, pp. 265-272.
- [26] N. Brady y R. Weil, «The nature and properties of soils,» New Jersey, Prentice-Hall, 2002, pp. 720-725.
- [27] G. Ortiz, «Qué son los Sistemas de Información Geográfica. Tipos de SIG y modelos de datos. Un artículo introductorio para entender las bases de los SIG,» Gabriel Ortiz, 2002 12 08. [En línea]. Available: <http://recursos.gabrielortiz.com>. [Último acceso: 18 Octubre 2016].
- [28] F. A. Ovalles y J. Rey, «Variabilidad interna de las unidades de fertilidad en suelos de la depresión del Lago de Valencia,» de *Agronomía Tropical*, Maracay, Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias, 1995, pp. 41-65.
- [29] J. R. Vasquez Polo, *Caracterización de la variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas en los suelos de granja experimental de la Universidad del Magdalena*, Santa Marta: Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, 2009.
- [30] B. Trangmar, R. S. Yost y G. Uehara, «Application of geostatistics to spacial studies of soil properties,» de *Advances in Agronomy*, Honolulu, College of tropical agriculture and human resources , 1985, pp. 45-94.
- [31] S. A. Utset, M. E. Ruiz, R. Irraragorri y L. Torres, «Estructura espacial de las propiedades del suelo,» de *III: Análisis bidimensional. Ciencias de la Agricultura*, La habana , Instituto Superior de Ciencias Agropecuarias, 1989, pp.

124-129.

- [32] E. Madero, O. Herrera y A. Castaño, «La variabilidad espacial en el estudio de la condición física del suelo,» de *Acta agronómica*, Valle de Palmira, 2000.
- [33] L. Gurovich y J. Stern, «Variabilidad especial de la velocidad de infiltración del agua en el suelo I. Generación de datos,» *Revista latinoamericana en Ciencias de la Agricultura*, vol. 10, nº 1, pp. 35-42, 1983.
- [34] F. A. Ovalles, *Memorias del curso de Geoestadística Aplicada a Estudios Ambientales con Énfasis en Suelos*, Manizales: Universidad de Caldas, 2001.
- [35] F. A. Ovalles, «Evaluación de la variabilidad interna de los suelos a nivel de parcela para el establecimiento en lotes experimentales en el estado de Cojedes,» *Agronomía Tropical*, vol. 41, nº 1, pp. 23-40, 1991.
- [36] D. Jaramillo, *Introducción a la Ciencia del Suelo*, Medellín: Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, 2003.
- [37] L. C. Londoño, *Módulo de Geoestadística. Documento de trabajo*, Buenaventura, Cali: Universidad de San Buenaventura, 2008.
- [38] G. Cámara, *Análise espacial de superficies*, Brasília: Livraria Virtual da Embrapa, 2002.
- [39] J. Espinosa, «Manejo de nutriente en Agricultura por Sitio Específico en cultivos tropicales,» de *In 11th Fertilizer Latin America International Conference*, Cancún, 2000.
- [40] MEGABRAS, «MEGABRAS: MTD 20KWe,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.megabras.com/es/productos/teluometro/teluometro-digital-MTD20KWe.php#Descrição>. [Último acceso: 06 Octubre 2016].
- [41] DTSI, «DTSI - Innovative solutions for your business,» [En línea]. Available: <http://dtsimexico.com/electrodos.html>. [Último acceso: 12 Octubre 2016].
- [42] PROMETRIC, «Trimble NOMAD Serie 900,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.prometric.com.mx/nomad.htm>. [Último acceso: 06 Octubre 2016].

- [43] Ingenieros Consultores Asociados, «ICA,» 2016. [En línea]. Available: [http://www.ica.com.uy/site/assets/files/1839/esp\\_terrasyntc\\_software.pdf](http://www.ica.com.uy/site/assets/files/1839/esp_terrasyntc_software.pdf). [Último acceso: 06 Octubre 2016].
- [44] JCA-SOFT, «Trimble Pathfinder Office,» 2016. [En línea]. Available: [http://www.jcasoft.com/index.php?page=shop.product\\_details&product\\_id=52&category\\_id=22&flypage=flypage.tpl&option=com\\_virtuemart&Itemid=265&v\\_mcchk=1&Itemid=265](http://www.jcasoft.com/index.php?page=shop.product_details&product_id=52&category_id=22&flypage=flypage.tpl&option=com_virtuemart&Itemid=265&v_mcchk=1&Itemid=265). [Último acceso: 06 Octubre 2016].
- [45] RUNCO, «Manual Pathfinder Office,» 2008. [En línea]. Available: <http://www.runco.com.ar/IMG/pdf/GuiaPFO2008.pdf>. [Último acceso: 06 Octubre 2016].
- [46] L. J. Peña, «Sistemas de información geográfica aplicados a la gestión del territorio,» *Editorial Club Universitario*, pp. 208-209, 2006.
- [47] P. H. Beckett y R. Webster, «Soil variability: a review soils and Fert.,» n° 34, pp. 1-15, 1971.
- [48] C. Buitrago , *Estudio sobre la variabilidad espacial de las propiedades de un suelo bajo dos condiciones: cobertura de bosque natural y laboreo permanente*, Palmira: Universidad Nacional de Colombia, 1995.
- [49] D. R. Nielsen, P. M. Tillotson y S. R. Vieira, «Analysing field measured soil water properties,» *Agricultural Water Management*, vol. 6, pp. 93-109, 1983.
- [50] R. S. Vieira, R. D. Nielsen y W. J. Biggar, «Spacial variability of fiel-measured infiltration rate,» *Soil Science Society of America Journal*, vol. 45, pp. 1040-1048, 1981.
- [51] ENARGAS, *NAG-108-Revestimientos de cañerías y accesorios*, Buenos Aires : ENARGAS, 2009.
- [52] W. V. Baeckmann, S. Wilhelm y W. Prinz, *Libro de mano de protección catódica*, Reino Unido: Elsevier science technology, 1997.
- [53] American Water Works Associations , *Standard for Automatically Controlled, Impressed-Current Cathodic Protection for the Interior of Steel Water Tanks*,

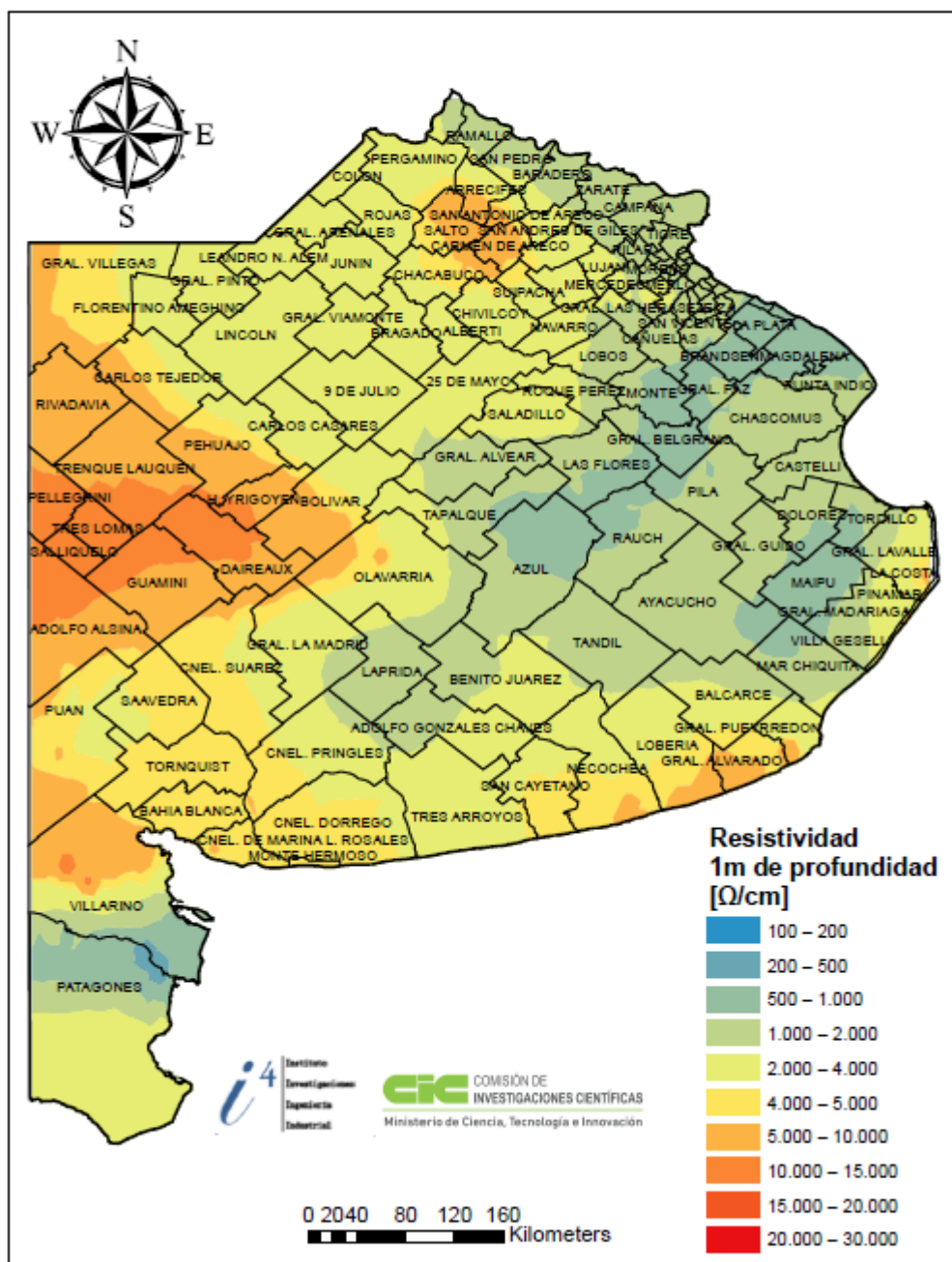
Denver: AWWA, 1997.

- [54] American Petroleum Institute (API), *Cathodic Protection of Aboveground Petroleum Storage Tanks*, Estados Unidos : American Petroleum Institute (API), 2014.
- [55] *Sistemas de cañería de gas y petróleo*, Canadian Standards Association , 2015.
- [56] Standars Australia, *AS-2832 Cathodic protection of metals*, Australian Standar, 2015.
- [57] *ASTM-G57-2012 Standar test method for field measurement of soil resistivity using the Wenner four-electrode method*, ASTM, 2012.
- [58] UBA, «Información Agroclimática,» [En línea]. Available: <http://www.agro.uba.ar/centros/ciag/info/AU>. [Último acceso: 29 Noviembre 2016].
- [59] L. Carvacho Bart, *Curso de geoestadística y análisis multicriterio*, Santiago de Chile : Pontificia Universidad Católica de Chile.
- [60] J. A. Cano Alvaréz, *Metodología para el análisis de la dispersión del ruido en aeropuertos; estudio de caso: Aeropuerto Olaya Herrera de la ciudad de Medellín*, Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2009.
- [61] Alcaldía de Bogotá, *Análisis espacial y geoestadístico del comportamiento de los precios de la vivienda nueva ofertada en Bogotá (2009-2011)*, Bogotá: Subsecretaría de Información y Estudios Estratégicos, Dirección de Información, Cartografía y Estadísticas, 2012.

# Anexos

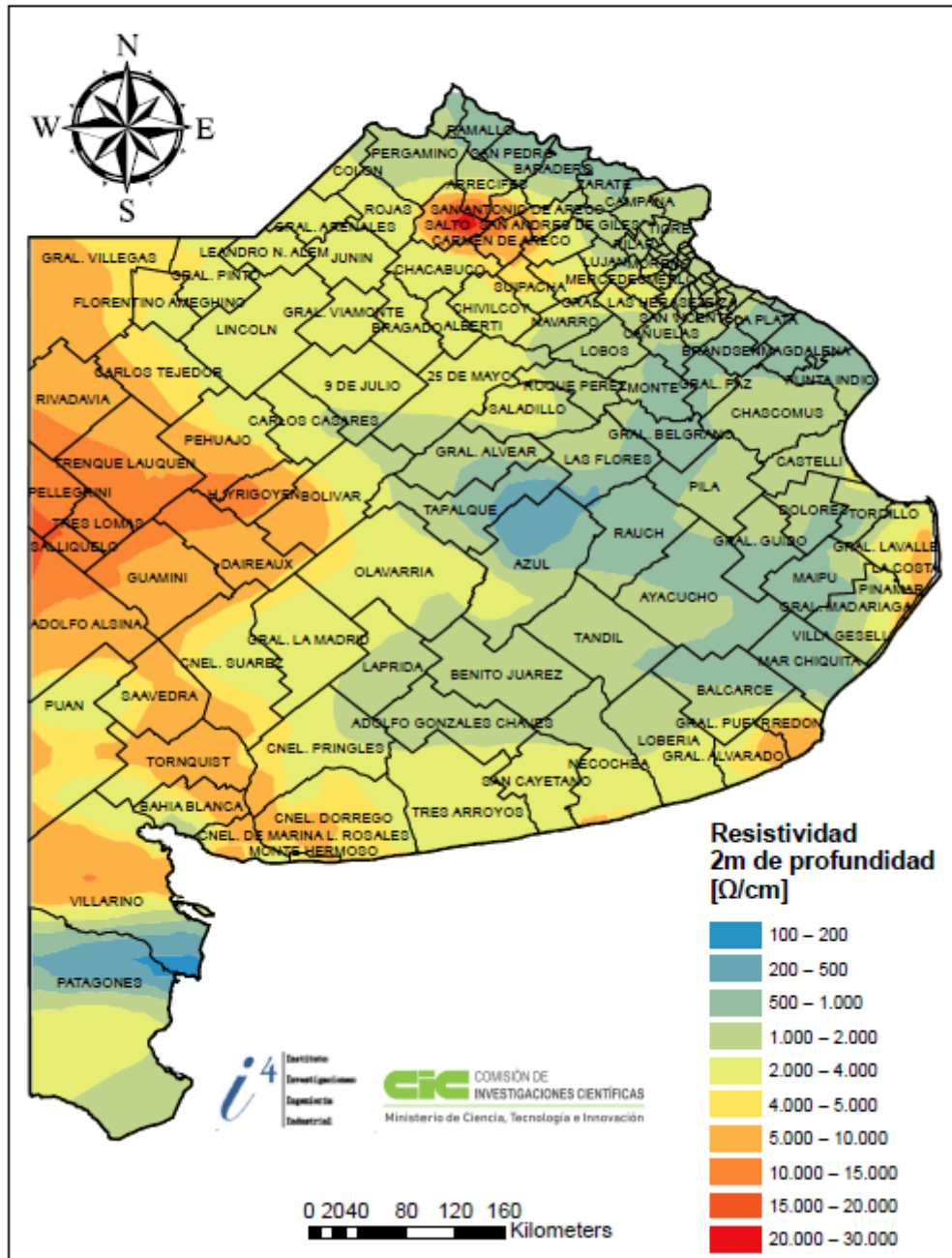


## Mapa de resistividades a 1 metro de profundidad Provincia de Buenos Aires República Argentina





# Mapa de resistividades a 2 metros de profundidad Provincia de Buenos Aires República Argentina





# Mapa de pH Provincia de Buenos Aires República Argentina

