



Relación entre datos geomecánicos medidos en ensayos spt y resistividad del subsuelo en la fm. Ubajay, Entre Ríos, Argentina

Relationship between geomechanics data measurement in spt test and resistivity of the subsoil in Ubajay fm., Entre Ríos, Argentina

Chury, Mario R. H.¹ ✉ - Silva Busso, Adrián A.^{1, 2, 3}

Recibido: 21 de junio de 2018 • Aceptado: 13 de mayo de 2019

Resumen

Este estudio es una primera aproximación de la relación entre la resistividad del subsuelo y sus características geomecánicas. En principio, se busca correlacionar el número de golpes y la humedad con la resistividad. El número de golpes y contenido de humedad son indicadores de la cohesión y arreglo interno de las partículas del suelo. En coincidencia con otros autores, entendemos que la medición de la resistividad de subsuelo es un método accesible para ser empleado con este fin y generar un modelo de correlación entre las propiedades geoeléctricas del subsuelo y sus características geomecánicas. Para llevarlo a cabo, considerando que la comparación de resultados puede resultar compleja en principio, se ha elegido una unidad geológica en particular la denominada F. Ubajay. Se busca de esta forma tener características geológicas lo más homogéneas posibles que facilite las interpretaciones y permita analizar comportamiento resistivo lo más claramente posible. Se encontraron correlaciones locales muy favorables entre el número de golpes y la resistividad ($r^2 = 0,66 - 0,98$) a partir de curvas de regresión sencillas polinomiales de segundo grado. Sin embargo, de forma regional los valores de correlación son bajos ($r^2 = 0,11 - 0,17$) y la dispersión es grande. De forma que no se ha encontrado un mecanismo de correlación aplicable a todos en su conjunto, pero sí en cada sondeo en particular, aspecto no mencionado en la escasa bibliografía disponible.

Palabras clave: Resistividad eléctrica; Geoeléctrica; Geomecánica; Correlación.

Abstract

This study is a first approximation of the relationship between the resistivity of the subsoil and its geomechanics characteristics. In the first way, we search correlate the number of strokes and humidity with resistivity. The number of blows and moisture content are indicators of the cohesion and internal arrangement of soil particles. In coincidence

1. Universidad Tecnológica Nacional Regional Concordia (FRCON), Entre Ríos.

✉ mrhchury@frcon.utn.edu.ar

2. DSH - Instituto Nacional del Agua (INA), Autopista Ezeiza Cañuelas - empalme J. Newbery Km 1,620, Ezeiza, Buenos Aires (Tel 011-44804500 int 5314) pntsas@ina.gov.ar

3. Dpto. Geología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Buenos Aires, Ciudad Universitaria, Pabellón II, Primer Piso, Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

with other authors, we understand that the measurement of subsoil resistivity is an accessible method to be used for this purpose and to generate a correlation model between the geoelectric properties of the subsoil and its geomechanics characteristics. To carry it out, considering that the comparison of results can be complex in principle, a geological unit has been chosen the Ubajay Formation. In this way, we have the most homogeneous geological characteristics possible to facilitate the interpretations and allow analyzing resistance behavior as clearly as possible. Very favorable local correlations were founded between the number of strokes and resistivity ($r^2 = 0.66 - 0.98$) from simple polynomial regression curves of second degree. However, in a regional way the correlation values are low ($r^2 = 0.11 - 0.17$) and the dispersion is large. In such a way, that no correlation mechanism has been found applicable to all as a whole, but if in each particular survey, aspect not mentioned in the scarce bibliography available.

Keywords: Electrical resistivity; Geoelectric; Geomechanics; Correlation.

ÁREA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA

Este trabajo comprende una región ubicada en la zona oriental de la provincia de Entre Ríos, de norte a sur entre las localidades de Ayuí-Concordia-Puerto Yeraú y de este a oeste entre el margen occidental del río Uruguay y la ruta Nacional 14, en el Departamento de Concordia, Provincia de Entre Ríos, Argentina (Figura 1). La zona se encuentra en un área de transición entre el clima subtropical y templado sin estación seca durante el año. Las temperaturas medias son de 26°C en verano y 13°C en periodo de invierno, siendo la temperatura media anual de 20-21°C.

La realización de importantes obras de estructuras en ingeniería civil, requieren esencialmente la determinación de las propiedades mecánicas del suelo para su correcta fundación. Por ello las propiedades del suelo, tales como su origen geológico, distribución granulométrica, capacidad para drenar agua, compresibilidad, resistencia cortante, capacidad de carga, entre otras son determinantes en la fundación de las obras civiles. En muchos casos estos estudios requieren que se lleven a cabo ensayos tanto in situ como en laboratorio a través de muestras extraídas del lugar. Debido a que las propiedades del suelo están sujetas a una variación espacial y temporal; por medio de los métodos convencionales, la cantidad de puntos evaluados están limitados. Estos métodos además son invasivos, costosos y consumen un tiempo considerable. Por ello determinar la relación entre una propiedad indirecta del subsuelo y relacionarla con el dato que se necesita conocer puede proporcionar un método económico, no invasivo y rápido que, debidamente parametrizado, ofrece ventajas sobre los métodos tradicionales. El problema surge en que la medición sobre el subsuelo de la resistividad con el fin de obtener algunos de sus parámetros geomecánicos es un campo de investigación poco estudiado y la bibliografía aporta pocos trabajos al respecto entre ellos los de *Cosenza et al. (2006)*, *Kumari et al. (2009)*, *Fahad et al. (2012)* y *Kowalczyk et al. (2014)* y *Filho et al., (2017)*. Este estudio no trata sobre la aplicación convencional de los métodos geoelectrónicos en el sentido de interpretar capas resistivas correlacionables con la geología o hidrogeología local, sino que su objetivo principal es comenzar a estudiar las relaciones entre la resistividad del subsuelo y los parámetros geomecánicos de los mismos, aprovechando la experiencia lograda por los otros autores mencionados (op.cit.).

Una observación crítica de los estudios mencionados es la falta de datos sobre la geología, o al menos la litología, en las determinaciones realizadas. Además, algunos de ellos fueron

hechos en laboratorio con material seleccionado que no responde a las condiciones naturales de ningún terreno en particular. Por lo tanto, se procedió en principio, a establecer un conjunto de premisas que especificaran mejor el objeto de estudio. Las mismas pueden resumirse según; (1) Definir claramente el contexto geológico la formación, facie o unidad geológica que se considerará en el estudio y tomarlo como heterogéneo; (2) Usar datos de la litología a partir de las muestras de perforación proveniente de los SPT (Standard Penetration Test); (3) Realizar sondeos eléctricos verticales 1D (SEV) con mediciones in situ y no en condiciones de laboratorio; (4) Hacer los SEV de forma paramétrica, es decir en el mismo sitio en que se tomaron las muestras; (5) Interpretar las capas resistivas en clara coincidencia con los cambios litológicos en las perforaciones y (6) Tener presente que la medida de resistividad verdadera no es una media directa sino que es un dato resultante de una interpretación que se corresponde a un modelo conceptual.

Considerando estas premisas se eligió la Fm. Ubajay como objeto de estudio, en parte por sus características litológicas y en parte porque suele ser el sustrato fundacional de las obras civiles viales en el área de estudio. A tal fin se empleó información proveniente de un total de 13 ensayos de SPT junto a los cuales se realizaron los SEV-1D (sondeo eléctrico vertical) parametrizando los mismos. Debe tenerse presente que la respuesta resistiva del terreno involucra el conjunto agua-roca, de aquí que el uso de pozos paramétricos (SEV realizado en pozos de geología conocida) y el conocimiento hidrogeológico regional por parte del interprete son las dos principales fortalezas de la interpretación. Todas las mediciones fueron in situ interpretando las respuestas resistivas con un modelo de 4 capas relativamente sencillo con el fin de correlacionar los datos resistivos obtenibles con la litología, humedad y el número de golpes (SPT). Esto fue finalmente interpretado mediante un análisis estadístico de los datos que busca fundamentar las posibles correlaciones. Entendemos que así obtenemos una metodología replicable pero que debe aplicarse en cada caso considerando los aspectos geológicos involucrados.

ANTECEDENTES GEOLOGICOS

La geología del subsuelo de la provincia fue en principio descrita por *Chebli et al., (1979)* interpretando que se alcanzan en profundidad niveles atribuibles a edades pérmicas, aunque con dudas, constituye el registro más profundo de la región. Posteriormente, y en particular sobre las Formaciones Serra Geral, Botucatu y Piramboia, (Triásico medio - Cretácico superior) se estableció su correlato en la R.O. Uruguay y se definieron aspectos hidrogeológicos en los trabajos de *Silva Busso*

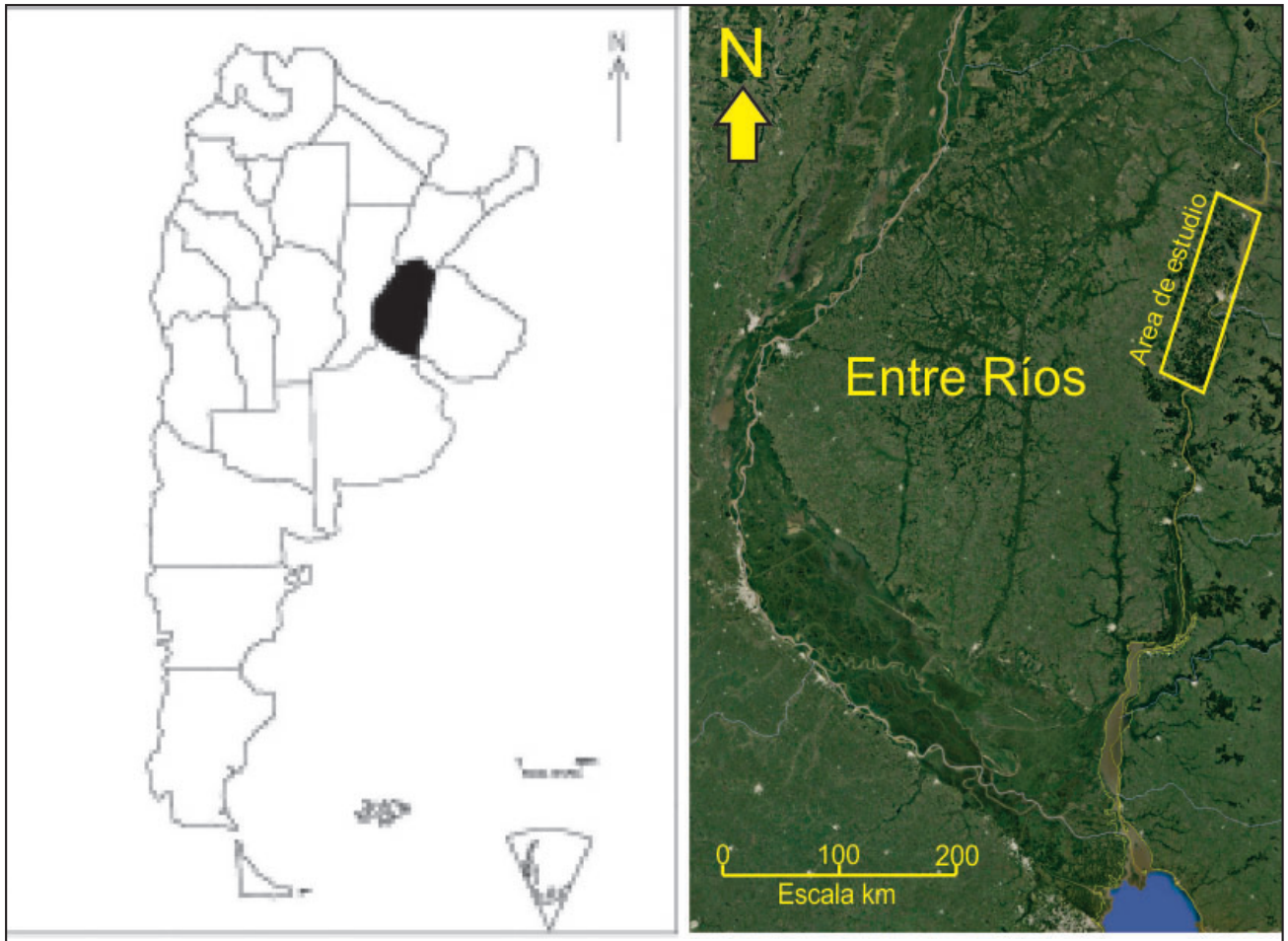


Figura 1. Localización del área de estudio.

(1999) y Silva Busso y Fernández Garrasino, (2004). También se pueden incluir algunos aportes relacionados con detalles de la litología de las secciones interbasáltica e infrabasáltica en Marsico, (2013) que no modifican sustantivamente la estratigrafía propuesta. En Silva Busso et. al., (2011) se realiza una síntesis del subsuelo suprabasáltico y su posible control estructural. El cretácico sedimentario está representado por la Formación Puerto Yerúa (De Alba y Serra, 1959) describen areniscas y brechas que afloran en la costa del río Uruguay, dichos autores son los primeros en describirla y Tófaló, (1986) determina una serie de Facies que le permiten determinar los procesos sedimentarios y ambiente deposicional de la Formación Puerto Yerúa. La F. Ascensio se describe en la zona de Colón en García (1954). El Neógeno fue estudiado por Aceñolaza (2000 y 2007) y también por Marengo (2002). Según Iriando, (1987) la región posee bien representada la geología del terciario superior y cuaternario. Esto comprende a la Formación Salto Chico (Gentile y Rimoldi, 1979) se define como una sucesión de arenas cuarzosas, estratificadas de granulometría media a gruesa de color ocre rojizo y amarillento fueron interpretados también como depósitos fluviales del río Uruguay, pero de edad Plio-pleistoceno. La misma ingresa desde el norte entre Mocoretá y Monte Casero (Silva Busso y Amato, 2017) describe un arco que converge sobre el Río Uruguay a la actual altura de Colón (Iriando, 1987). La otra unidad coetánea es la F. Ituzaingó (De Alba, 1953) compuesta esencialmente de dos ciclos psamíticos granoderecientes claramente separados que se considera un cambio lateral de

facies hacia el poniente entrerriano con respecto a la mencionada F. Salto Chico. Con más detalle la relación estratigráfica de los sedimentos del plio-pleistoceno fluvial han sido estudiados recientemente por Silva Busso y Amato (2017). La Formación Hernandarias (Reig, 1956) constituye la cubierta cuaternaria (pleistocena) que se extiende sobre la mayor parte de la provincia, aunque en la zona casi no está representada, es importante mencionarla como límite occidental del área de estudio. Está constituida por arcillas, limos arcillosos y arcillas limosas con proporción variable de limos y excepcionalmente arenas muy finas. Suele ser de color gris plomizo, verde claro y castaño rojizo pudiendo contener concreciones calcáreas y niveles de yeso.

La Formación Ubajay, (Holocena), definida por Gentile y Rimoldi, (1979) originalmente sobre la margen derecha del Río Uruguay en cercanías del arroyo El Palmar, se compone de psefitas gruesas, arenas y limos moderadamente seleccionadas con arcillas interporales. Al igual que su litología su espesor es variable según la zona de afloramiento y suele tener espesores entre 2 - 15m. La misma fue interpretada por Iriando (1980) como de origen fluvial siguiendo la migración predominante hacia el este del río Uruguay y niveles de base más altos que los actuales, definiéndola como la terraza alta del río Uruguay (Iriando, 1987). Un estudio de más detalle sobre el ambiente de sedimentación lo presentan Silva Busso y Amato, (2013). Estos autores caracterizan esta unidad por portar sedimentos del tipo arenoso o gravo-arenoso hacia la base y arenoso fino hacia el techo, al igual que muchas secuencias de origen

tractivo-fluvial. El arreglo externo o arquitectura sedimentaria de sus depósitos tiene tendencia granodecreciente hacia arriba o lineal no definida, y puede ser clasificada como de Arquitectura Tipo Fluvial Múltiple (Ar f-M) y en algunos sectores de Arquitectura Tipo Fluvial Unitaria (Ar F-U). Si bien existen afloramientos de esta unidad en la costa del Río Uruguay y en diversos arroyos afluentes (Rossi, 2012) los principales sitios de observación, por su potencia de exposición, son las canteras de la región. Lógicamente, también se la identifica en los pozos pero el problema es que su litología es similar a las Formaciones Ituzaingó y Salto Chico. Según Silva Busso y Amato (2017) el hecho de que suele superponerse a las mencionadas unidades puede provocar confusiones o la imposibilidad de establecer con precisión el pase formacional entre estas, lo que conducen en muchos casos a la falta de reconocimiento de la F. Ubajay en las interpretaciones estratigráficas.

La F. Ubajay y su relación con la F. Hernandarias tampoco se halla muy clara aún; pero la aparición e incremento de los espesores de esta última unidad al alejarnos del cauce del río Uruguay actual, hace pensar en un contacto erosivo entre los depósitos infrayacentes de la Formación Hernandarias (Silva Busso et al., 2011 y Silva Busso y Amato, 2017). Los depósitos de la F. Hernandarias pudieron haber sido totalmente erosionados hacia la costa del río Uruguay por la migración del antiguo cauce del Río Uruguay (como lo menciona Iriondo 1987), para luego dar paso a la depositación de aquellos sedimentos gravo-arenosos con abundantes finos más típicos de la Formación Ubajay. Para el área de la costa argentina del río Uruguay la F. Ubajay se extiende de norte a sur desde la desembocadura del río Mocoretá hasta Punta Caballos en el Dpto. de Gualeguaychú (Silva Busso y Amato 2017), aunque estos límites aún son imprecisos y requieren de confirmación a la luz de nuevos datos. En términos generales, toda la secuencia plio-pleistocena - actual apoya en discordancia sobre los sedimentos continentales cretácicos y marinos miocenos y continentales eocenos.

Desde el aspecto aplicado la F. Ubajay presenta posibilidades acuíferas, mineras (áridos) y ventajas para las fundaciones y cimentaciones de las obras civiles. En Silva Busso y Amato (2013) se realiza una primera aproximación a sus ventajas acuíferas que, aunque poco considerada como acuífero, resulta importante desde el punto de vista de su uso actual y potencial. Las estimaciones realizadas sobre demandas, reservas y recargas determinan que la explotación del Acuífero Ubajay oscilaría entre el 3,6% de sus Reservas Reguladoras y el 15,7% de las Reservas Efectivas siendo hoy estas reservas suficientes para satisfacer ampliamente la demanda del recurso. La demanda de agua sobre el acuífero Ubajay es en un 15,07% la forestal, un 46,55% consumo humano y un 53,44% la ganadería (Silva Busso y Amato, 2013).

Según Muñoz, et al., (2010) existen importantes reservas de gravas y arena en la región. La construcción de la autovía de la ruta 14, impulsó la apertura de nuevas canteras, así como la reactivación de algunas abandonadas. No obstante, dichos autores determinan que son variables las condiciones de explotación, como por ejemplo el destape, así como el porcentaje de grava de cada yacimiento, que oscila entre un 30 y 70% en volumen determinando el porcentaje de finos. También el contraste litológico entre las dos unidades aflorantes F. Ubajay y F. Hernandarias determina que la primera resulte más conveniente al definir la traza vial. La F. Hernandarias es bien conocida por su elevada proporción de arcillas expansivas por lo que se prefiere, como el caso de la ruta 14, a la F. Ubajay como sustrato.

De aquí se deduce que este factor geológico condiciona las obras civiles viales en la región de estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se mencionó previamente se realizaron 13 SEV paramétricos en las respectivas posiciones donde se realizaron otros 13 SPT. Las ubicaciones de los mismos se observan en el mapa de la figura 2. Debido a que algunos de ellos se encuentran muy cercanos entre sí y no es posible representarlos en la escala del mapa así que se han señalado las zonas y el cuadro adjunto muestra las coordenadas de cada uno de ellos en la zona de estudio.

La elección de los puntos no fue arbitraria, se seleccionaron aquellos SPT realizados sobre la F. Ubajay exclusivamente y se buscó la mejor distribución posible dentro del área de estudio. Esto determinó que de un conjunto de 32 SPT se eligieran 13 para el estudio paramétrico. Los ensayos SPT son las fuentes de información más común de los estudios de suelo, aunque no la más fiable (Gonzales de Vallejo et al., 2002).

En esta dirección diversos autores han estudiado la correlación entre las resistividades y los datos provenientes de ensayos de campo como los SPT. Kumari et al. (2009), encontraron una buena correlación entre la resistividad y datos geomecánicos del suelo obtenida por medio del SPT. Fahad et al. (2012), a partir de muestras tomadas con SPT a diferentes profundidades, mostró una buena correlación entre la resistividad y su contenido de humedad. Lo mismo le sucedió entre la resistividad y su ángulo interno de fricción. Por otro lado, se obtuvo una pobre correlación entre la resistividad y el peso específico; y entre la resistividad y la cohesión. Utilizando otros ensayos de campo Cosenza et al. (2006) encuentran una buena correlación entre la resistividad y la resistencia mecánica, obtenida esta mediante el cono de penetración dinámica. En cambio, si obtuvieron una buena correlación entre la resistividad y su contenido de agua como en Fahad et al. (2012). Por otro lado, Kowalczyk et al. (2014) investigaron la relación entre la resistividad en suelos no cohesivos relacionándola con su grado de compactación. Dicho estudio lo realizaron en laboratorio, simulando suelos no cohesivos con diferentes grados de compactación e hicieron mediciones de resistividad eléctrica. Concluyeron que los métodos de resistividad eléctrica no pudieron discriminar grados de compactabilidad con una correlación significativa. Filho et al. (2017) realizan un estudio de correlación entre la resistividad eléctrica aparente del suelo, la humedad, la compactación del suelo y el contenido de arcilla. El objetivo principal de este trabajo era desarrollar una metodología para correlacionar el contenido de agua en el suelo, el contenido de arcilla y la compactación con las propiedades eléctricas del suelo, medida por métodos de prospección geoelectrica. Concluyen en que la resistividad varía considerablemente con el cambio en el contenido de humedad del suelo, pero también disminuye con el aumento del contenido de arcilla, o sea con suelos más cohesivos.

Estas experiencias indican que la posibilidad de encontrar correlaciones y resultados favorables en el empleo de métodos geoelectricos y características mecánicas de los suelos ofrece diversas posibilidades interpretativas. Siguiendo esta línea de análisis y en una primera etapa hemos tomado la litología descrita según la SUCS y el número de golpes de los SPT disponibles con la intención de buscar correlaciones significativas. Los datos se presentan en la tabla 1.

Los SEV (sondeos eléctricos verticales) de la figura 3 son de carácter paramétrico debido a que su posición está en función

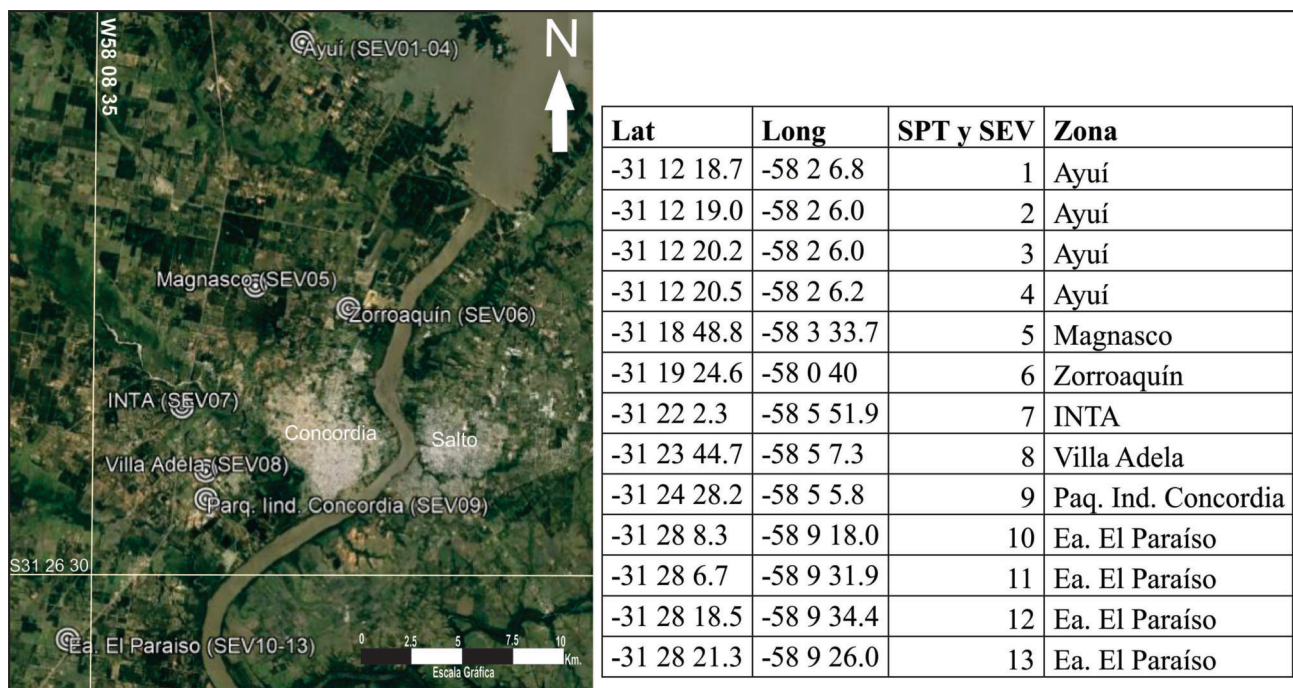


Figura 2. Puntos paramétricos SPT y SEV y cuadro adjunto con las coordenadas de los mismos.

Tabla 1. Ensayo (SPT), profundidad (Pm), número de golpes (G) y clasificación (SUCS)

SPT	P(m)	G	SUCS	SPT	P(m)	G	SUCS	SPT	P(m)	G	SUCS	SPT	P(m)	G	SUCS
1	0,75	11	SC	5	0,75	10	CH	9	0,75	7	SM	13	0,75	3	SP
	1,75	17	SC		1,75	9	CH		1,75	6	SC		1,75	8	SP
	2,75	20	SP		2,75	16	SC		2,75	12	SC		2,75	12	SP
	3,75	12	SP		3,75	22	SM		3,75	13	SP		3,75	14	SP
	4,75	18	SM	6	0,75	16	SC		4,75	34	SC		4,75	15	SP
2	0,75	9	SC		1,75	17	SC	10	0,75	2	SP				
	1,75	14	SM		2,75	11	SC		1,75	11	SP				
	2,75	12	SP		3,75	10	SM		2,75	9	SP				
	3,75	12	SP		4,75	10	SP		3,75	13	SP				
	4,75	12	SP	7	0,75	7	SC		4,75	15	SP				
3	0,75	3	SC		1,75	9	SC	11	0,75	15	SC				
	1,75	13	SC		2,75	15	SC		1,75	21	SC				
	2,75	22	SP		3,75	34	SM		2,75	13	SP				
	3,75	17	SP	8	0,75	8	SC		3,75	16	SP				
	4,75	14	SP		1,75	8	SC		4,75	20	SP				
4	0,75	9	SC		2,75	18	SM	12	0,75	11	SC				
	1,75	9	SC		3,75	15	SC		1,75	8	SC				
	2,75	19	SM		4,75	16	SM		2,75	8	SC				
	3,75	23	SP						3,75	11	SP				
	4,75	16	SP						4,75	10	SP				

de las zonas donde existía información de los SPT. Las curvas de campo obtenidas fueron en general de buena calidad ya que no aparecieron datos anómalos. La información recopilada de las descripciones litológicas de los SPT es utilizada para el ajuste paramétrico de las respectivas posiciones medidas y para una mejor interpretación global del esquema litológico de la zona. Como el tendido es constante en longitud ($AB/2=27m$) la profundidad de alcance está acotada a rangos entre 12 - 15 mbbp

de forma que las curvas de resistividad aparente de los SEV han permitido interpretar la disposición de los niveles resistivos e identificado hasta cuatro capas resistivas en correlación con las descripciones litológicas dentro de este intervalo. La distribución de los horizontes resistivos en superficie y profundidad es muy variable en espesores, profundidades, pero la salinidad de las aguas de los acuíferos es relativamente la misma entre 250-300 mg/l.

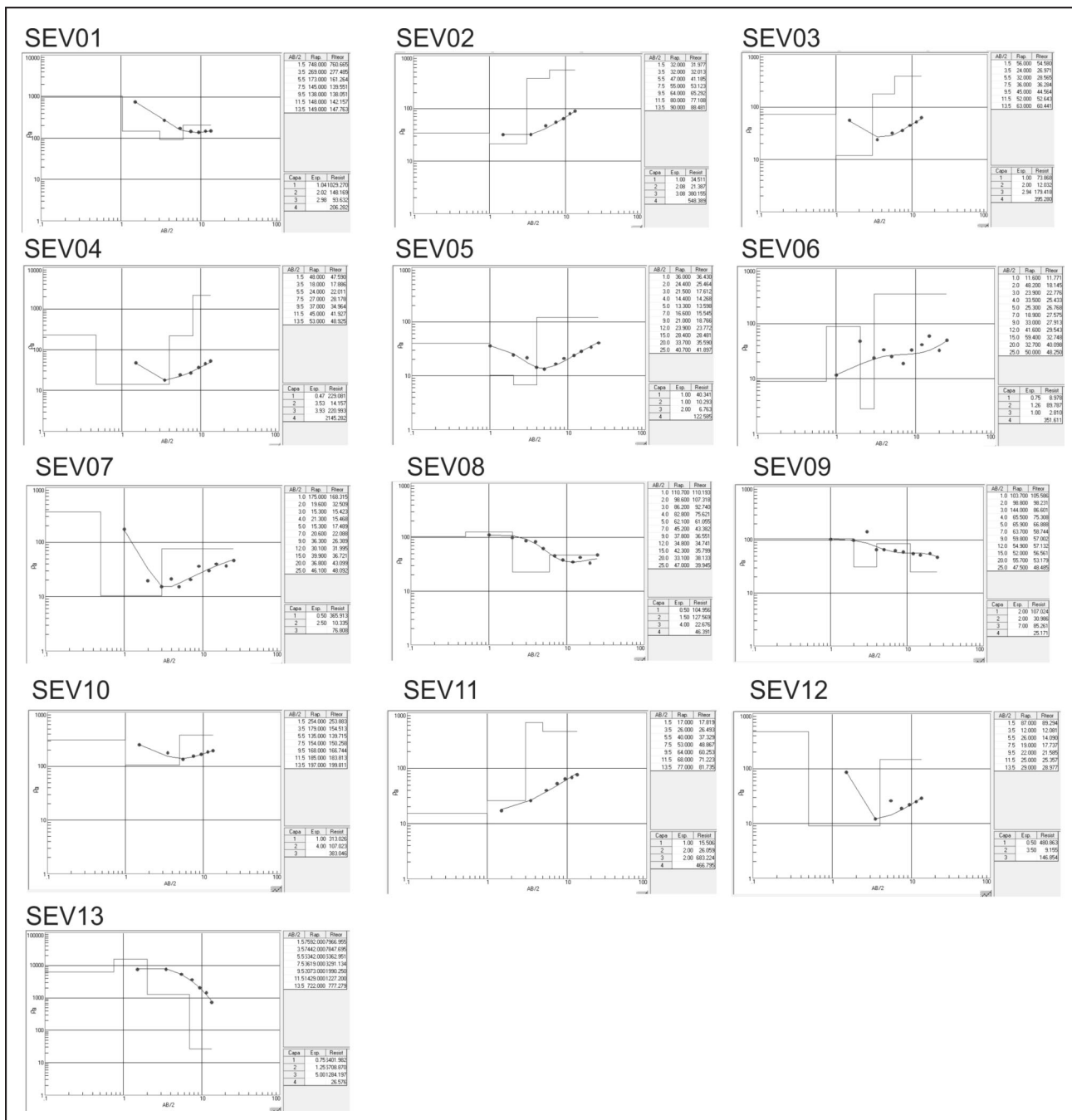


Figura 3. Diagramas de los SEV-1D parametrizados con los SPT.

Las unidades resistivas se han interpretado bajo los siguientes criterios, (1) la zona no saturada es relativamente poco potente, (2) la zona saturada contiene aguas que son normalmente dulces, (3) las litologías establecen en principio los cambios significativos de resistividad. (4) la litología es el factor más importante de las propiedades geomecánicas del suelo. A continuación, se detalla la interpretación geoelectrica donde el concepto es interpretar la disposición de los niveles resistivos en profundidad y correlacionarlos con la litología en cada SPT y en el conjunto global de datos obtenidos. El resultado es la tabla 2 que resume las diferentes resistividades de cada capa en relación directa con la litología descrita en el ensayo SPT. La correlación propuesta a continuación intenta ese vínculo interpretativo que es fundamental

para comprender las correlaciones con el número de golpes. Lo que se debe considerar es que existe un valor promedio de resistividades por capa relacionado a diferentes litologías en el contexto de cada región que puede ser interpretada de diferente forma.

Se observan cuatro litologías claramente definidas en los SPT, las Arenas arcillosas (SC), las Arenas limosas (SM), las Arenas Gravasas (SP) y las Arcillas orgánicas y plásticas (CH). Estas últimas solo se observan en un horizonte de un solo ensayo y son litologías poco frecuentes en la F. Ubajay poseen un valor de resistividad promedio de 21 ohm.m, pero la escasas del muestreo y ocurrencia no nos permite considerarla como representativa. No obstante, es la resistividad más baja y corresponde

a suelos que sería más cohesivos. Si nos concentramos en un sencillo análisis estadístico de las arenas (SC, SM y SP) notaremos que la resistividad no posee una distribución de Gauss si no que ajusta a una distribución Gamma (no tiene sentido físico que la resistividad tome valores negativos y existe cierta tendencia a que la cola de la distribución se prolongue en valores más elevados).

Esto último nos hace pensar que el valor promedio aritmético de resistividad no sería el más representativo y que un

análisis del histograma de distribución presentado en la modalidad “box plot” nos permite calcular la mediana y los valores contenidos entre los percentiles de 25 y 75 como rango de variabilidad. Este análisis se ha realizado de dos formas, una considerando todos los datos y otra suprimiendo los valores muy elevados del SPT 13 y la primera muestra del SPT 01 dado que se los considera anómalos. La razón de considerarlos así es que escasos valores de humedad en una zona no saturada muy permeable, lo que eleva notoriamente los valores de resistividad.

Tabla 2. Ensayo (SPT), clasificación (SUCS) y Resistividad (Ohm.m).

SPT	SUCS	Ohm.m	SPT	SUCS	Ohm.m	SPT	SUCS	Ohm.m	SPT	SUCS	Ohm.m
1	SC	748	5	CH	24	9	SM	101	13	SP	7966
	SC	266		CH	17		SC	89		SP	7848
	SP	171		SC	13		SC	66		SP	5363
	SP	144		SM	15		SP	57		SP	3291
	SM	139	6	SC	18		SC	55		SP	1990
2	SC	10		SC	23	10	SP	254			
	SM	32		SC	27		SP	154			
	SP	44		SM	28		SP	140			
	SP	56		SP	28		SP	150			
	SP	68	7	SC	69		SP	167			
3	SC	57		SC	15	11	SC	18			
	SC	23		SC	17		SC	26			
	SP	28		SM	21		SP	37			
	SP	36	8	SC	95		SP	49			
	SP	45		SC	91		SP	60			
4	SC	47		SM	67	12	SC	89			
	SC	18		SC	48		SC	12			
	SM	22		SM	38		SC	14			
	SP	28					SP	18			
	SP	36					SP	22			

El resumen del análisis estadístico se observa en la tabla 3 y la figura 4, presenta los gráficos de “box plot” de los datos de resistividad. Si se analizan independientemente se verá que en el caso de considerar los valores anómalos las muestras tipo SC muestran mayor resistividad seguida por las muestras SP y las SM, sin embargo, si se eliminan los datos anómalos cambian las relaciones y las muestras SP aparecen como más resistivas seguidas de las SM y las SC. Este último resultado es más compatible con lo que conceptualmente se esperaría, es decir,

que los suelos de menor material fino y por ende, menor cohesión, (SP) poseen mayor resistividad que los de mayor material fino y resultan con mayor cohesión (SM y SC), incluso el valor de SC tiende a asemejarse a las muestras CH (21 ohm.m) claramente más cohesivas. La variación cuando se consideran los datos anómalos puede explicarse si tenemos en cuenta el papel que juega la humedad del suelo en zona no saturada, en estas muestras el nivel estático se encontraba entre 3 y 6 metros de profundidad, pero el SPT 1 y 13 están completamente en zona no saturada.

Tabla 3. Parámetros estadísticos de la resistividad media en las muestras psamíticas de los SPT.

SUCS	Con datos anómalos			Sin datos anómalos		
	SC	SP	SM	SC	SP	SM
Resistividad promedio arit.(ohm.m)	81	1084	51	40	83	51
Resistividad Mínima (ohm.m)	10	18	15	10	18	15
Resistividad Máxima (ohm.m)	748	7966	139	95	254	139
Resistividad Mediana (ohm.m)	270	64	32	26	56	32
Resistividad percentil (25) (ohm.m)	180	36	22	18	36	22
Resistividad percentil (75) (ohm.m)	790	170	67	57	144	67
Intervalo entre percentiles (ohm.m)	610	134	42	39	108	45

Los SEV fueron tomados en los meses secos siendo el agua en tránsito y los contenidos de humedad muy bajos porque noviembre del 2017 presento un 50% menos precipitaciones que la media histórica (INTA, 2018). También los intervalos resistivos entre percentiles considerando los datos anómalos muestran mayor variación en las muestras SC que en SP y SM sucesivamente, nuevamente a consecuencia de cambios en la

humedad. Sin embargo, por el contrario, esto vuelve a modificarse si sacamos los datos anómalos donde SP adquiere mayor oscilación que SM y SC sucesivamente, pero en este caso se lo atribuimos a cambios porcentuales del material fino en la matriz de las muestras SP que se traduce también en cambios de la cohesión del suelo.

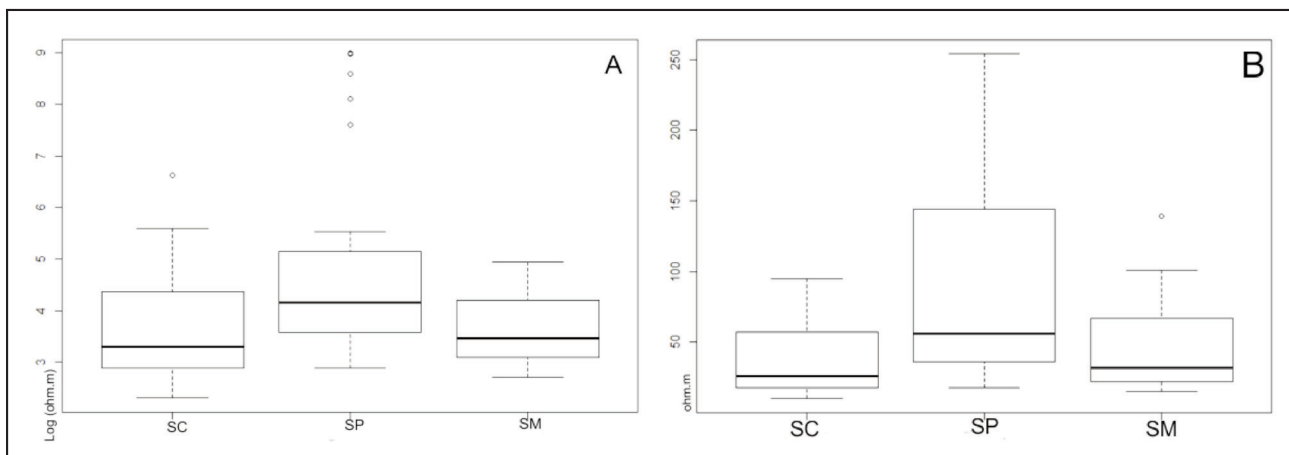


Figura 4. Resistividades medianas A) con datos anómalos y B) sin datos anómalos.

En términos generales los contenidos de humedad en la zona no saturada o incluso las muestras tomadas en zona saturada serían los responsables de la dispersión de los valores de resistividad, tal como lo plantean *Fahad et al. (2012)* sobre la base de los estudios de laboratorio. Sin embargo, cuando es filtrada esta posibilidad pueden atribuirse los cambios resistivos a la cohesión. Este criterio es importante en la futura búsqueda de correlaciones eficaces entre resistividades y litologías dado que estas últimas son el factor más importante en parámetros como la cohesión o el arreglo interno de las partículas del suelo. Si las muestras son tomadas en zona saturada debe tenerse presente que las aguas pueden contener salinidades diversas lo que modifica sus valores de resistividad, aunque no sea el caso de la F. Ubajay en este estudio, si puede serlo en otras unidades geológicas. Por consecuencia no debe pensarse que un valor determinado de resistividad corresponde invariablemente a una determinada litología poniendo en relevancia el uso de pozos paramétricos sectorizados sobre la base de un modelo hidrogeológico local. El trabajo de *Kumari et al. (2009)* y de *Kowalczyk et al. (2014)* muestran buenas correlaciones entre datos geomecánicos calculados a partir de ensayos SPT y resistividad. El punto de partida es el número de golpes que en sí mismo no representa una medida directa de las propiedades de los suelos y únicamente es apropiada su utilización cuando existen correlaciones empíricas (*Gonzales de Vallejo et al., 2002*). En particular existen dudas al utilizar las correlaciones del SPT con las características geotécnicas de los materiales arcillosos saturados, debido a generación de presiones intersticiales durante el golpe de hincado y al rozamiento durante la toma muestras. Esto se traduce en una gran dispersión de los resultados en las diferentes correlaciones razón por la cual el SPT debería ser usado únicamente en suelos arenosos (*Gonzales de Vallejo et al., 2002*). Considerando estas observaciones entendemos que disponemos de un muestreo de material de los

ensayos SPT fundamentalmente arenoso no muy cohesivo que con las resistividades nos ha permitido estudiar diferentes correlaciones evaluando las regresiones lineales, polinómicas, logarítmicas y exponenciales posibles en cada caso. Un primer intento fue analizar una correlación empleando todos los datos de número N golpes y resistividad del muestreo sin discriminar por litología. El resultado dio una gran dispersión de datos para todos los métodos de regresión y hubo valores de correlación bajos o poco significativos con un $r^2 = 0,11 - 0,16$. Un segundo análisis consistió en correlacionar el número de golpes obtenidos discriminados por las diferentes litologías (SP, SM y SC) con la resistividad. También es este estudio los análisis de todos los casos de regresión fueron valores de correlación bajos o poco significativos que oscilaron en un r^2 entre $0,12 - 0,17$. En síntesis, los intentos de regionalización de los resultados no parecen dar resultados favorables. En virtud de lo observado se optó por buscar correlaciones locales empleando los mismos métodos citados, pero en este caso correlacionando el número de golpes con la resistividad en cada punto paramétrico SEV-SPT independientemente. (figura 5).

Diez de los trece SEV-SPT paramétricos han sido correlacionados con una regresión polimodal cuadrática o de orden 2. Solo los SEV-SPT 01, 05 y 11 presentan correlaciones bajas ($r^2 = 0,46, 0,36$ y $0,18$ respectivamente) los restantes presentan correlaciones buenas a muy buenas con valores de r^2 entre $0,67$ a $0,98$. Una explicación rápida es atribuirlo a las incertidumbres y errores esperados para los ensayos de SPT ya mencionados por diversos autores (op.cit), pero el marcado contraste de ambas situaciones (malas correlaciones en unos y muy buenas en otros) nos hace suponer que no se trata de un factor sistemático que pudiera tener mayor o menor influencia. Otro aspecto es el aumento del material fino y por ende la cohesión que pudiera alejar las condiciones reales del ensayo de las ideales (suelos

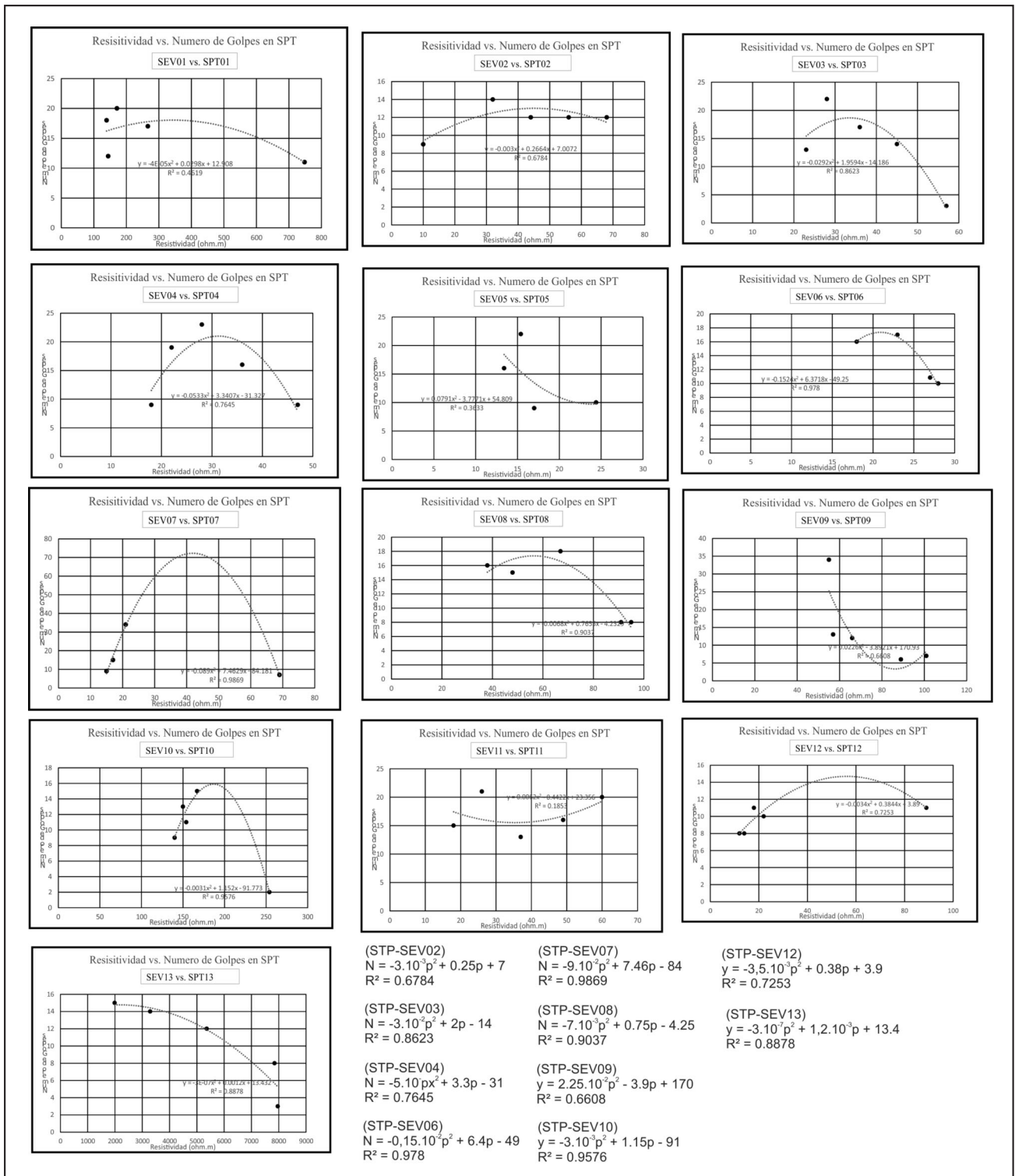


Figura 5. Correlaciones y regresiones significativas SPT –SEV (N: golpes; p: resistividad).

arenosos poco cohesivos). En este sentido se podría explicar la baja correlación en el SPT-05 donde pareciera haber notoriamente más arcilla e incluso posee niveles descriptos como CH alejándolo de las condiciones ideales de ensayo, no obstante, a los SPT 01 y 11 no les cabría esta explicación ya que no son litológicamente diferentes de otros similares con muy buenos ajustes de correlación. Se puede considerar también que la clasificación de la SUCS es insuficiente para darnos una adecuada idea de la litología,

faltan datos sobre el coeficiente de uniformidad, densidad e incluso la porosidad total que influirían en la medición de la resistividad (Archie, 1941) resultando en correlaciones poco significativas. Una observación relacionada con la interpretación resistiva tiene que ver con el hecho de que en los SPT 01, 05 y 11 parece haber cambios litológicos muy rápidos representados por alternancia de niveles arcillosos y gravosos de poco espesor. Esto haría más compleja la interpretación geoelectrica porque

esas pequeñas capas serían asimiladas a capas resistivas más potentes resultando en un desajuste entre el modelo interpretativo y la conformación vertical del terreno atravesado. El resultado bien puede ser una inadecuada o baja correlación entre el número de golpes de cada intervalo en los SPT y los datos resistivos. En síntesis, este marcado contraste de las correlaciones no es simple de explicar desde una sola hipótesis de estudio y también puede deberse a un conjunto de las ya mencionadas actuando al mismo tiempo.

Más allá de las consideraciones que podrían explicar las anomalías el 75% de los sondeos paramétricos han presentado una correlación elevada y significativa con respecto al número de golpes de los SPT. Estas poseen características comparables más allá de que ajustan con una regresión polinómica de grado 2 como, por ejemplo; los factores del término cuadrático son negativos y en rangos entre 10^{-1} y 10^{-7} ; los términos lineales son entre 10^1 y 10^{-3} y sus términos independiente muy variables pero entre 10^1 y 10^2 . Esto puede coincidir con la idea de obtener una buena correlación local y la mala correlación regional de la información mencionada previamente, pero aún sería prematuro establecer las causas de ello.

CONCLUSIONES

Es indudable que este estudio muestra una posibilidad de investigación novedosa en la búsqueda de encontrar indicadores indirectos de los parámetros geomecánicos de los suelos, sus variaciones y su aplicación. Las correlaciones significativas halladas a partir de los datos de los SPT dejan claro que es posible

encontrar relaciones entre los valores de resistividad eléctrica y los parámetros geomecánicos pudiendo ser aplicable localmente en estudios geotécnicos, pero también muestra que es necesario un trabajo detallado de laboratorio para comprender mejor e individualizar la influencia de cada aspecto litológico.

Por el momento y a partir de los datos de campo se observan buenas correlaciones de resistividades y litologías influenciadas en principio por el contenido de humedad, como es de esperar, pero a nivel local y con valores de humedad relativamente constante hay muy buenas correlaciones a partir de curvas de regresión sencillas polinomiales de grado 2 ($r^2 = 0,66 - 0,98$). Si bien estas aún no han sido debidamente justificadas en el alcance de este estudio, es un paso adelante considerando la bibliografía existente. En consonancia con los estudios disponibles realizados por otros autores se observa la influencia y relación de las mismas variables, pero se ha mejorado en la cuantificación y las consideraciones geológicas e hidrogeológicas del análisis. Si bien se han encontrado correlaciones locales favorables aún no se ha encontrado un mecanismo de correlación aplicable a todos los puntos de medición en su conjunto. Esto puede deberse a la heterogeneidad litológica regional de la F. Ubajay por lo que, aunque se pueda afirmar que existen correlaciones locales entre las variables estudiadas es aún prematuro aseverar que los parámetros geomecánicos puedan ser correlacionados con la resistividad de forma regional. Hacia futuro, deberá desarrollarse una metodología, con auxilio de análisis en laboratorio, que tenga en cuenta la variabilidad que presente el subsuelo considerando las limitaciones de las técnicas de los métodos empleados para obtener resultados predictivos favorables.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

ACEÑOLAZA, F. 2000.

La Formación Paraná (Mioceno medio): estratigrafía, distribución regional y unidades equivalentes. En: Aceñolaza, F. y Herbst, R. (Ed.) *El Neógeno de Argentina. Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo de la Universidad Nacional de Tucumán, Instituto Superior de Correlación Geológica (INSUGEO), Serie Correlación Geológica 14: 9-27, Tucumán.*

ACEÑOLAZA, F. G., 2007.

Geología y Recursos Geológicos de la Mesopotamia Argentina, *INSUGEO Serie de Correlación Geológica 22, Tucumán, Argentina. 150 pp*

ARCHIE, G. E., 1941.

The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Trans. AIME 146, 54-62.*

CHEBLI, G., O. TOFALO Y G. TURAZZINI, 1989.

Mesopotamia. En: Chebli, G. y L. Spalletti (Ed.) *Cuencas Sedimentarias Argentinas. Universidad Nacional de Tucumán, Instituto Superior de Correlación Geológica, Serie Correlación Geológica Nº 6: 79-100, Tucumán*

COSENZA, P., MARMET, E., REJIBA, F., CUI, Y. J., TABBAGH, A., CHARLERY, Y., 2006.

Correlations between geotechnical and electrical data: A case study at Garchy in France. *Journal of Applied Geophysics 60, 165-178.*

DE ALBA, E. 1953.

Geología del Alto Paraná, en relación con los trabajos de derrocamiento entre Ituzaingó y Posadas. *Asociación Geológica Argentina Revista 8(3): 129-161, Buenos Aires*

DE ALBA, E. Y N. SERRA, 1959.

Aprovechamiento del Río Uruguay en la zona de Salto Grande. *Informe sobre las condiciones y características geológicas. Dirección Nacional de Geología y Minería Anales 11, Buenos Aires, Argentina. pp:162*

FAHAD, I. S., SYED, B. A., 2012.

Integrating geoelectrical and geotechnical data for soil characterization. *International Journal of Applied Physics and Mathematics, vol. 2, Nº2.*

- FILHO A., OLIVEIRA M. PIRES, T., ALVES, A., CALIXTO, A., NARCISO, M., 2017.
Correlation method of physical characteristics with electrical properties of soil.
Transactions on Environment and Electrical Engineering (ISSN 2450-5730) Vol 2, No 2, pp: 16-24.
- GARCÍA P (1954).
Hoja de Reconocimiento Geológico e Hidrogeológico Arroyo Barú 1/100000.
Servicio de Inteligencia Militar del Terreno. Ejército Argentino (inédito) 78pp
- GENTILI, C. Y RIMOLDI H. 1979.
Mesopotamia. Academia Nacional de Ciencias,
Segundo Simposio Geología Regional Argentina, 1: 185-223, Córdoba
- GONZALEZ DE VALLEJO L., FERRER M., ORTUÑO L. Y OTEO C. S, 2002.
Ingeniería Geológica.
Paerson Education (ISBN: 8420531049), Madrid, España. Pp: 744.
- INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA (INTA), 2018.
Agrometeorología Concordia.
Datos y pronósticos agrometeorológicos registrados en la Estación Agropecuaria Concordia, Entre Ríos, Argentina.
Disponible en <https://inta.gob.ar/documentos/agrometeorologia-concordia> último acceso 30 de Diciembre del 2018.
- IRIONDO, M., 1980.
El cuaternario de Entre Ríos,
Rev. Asoc. Cienc. Nat. Litoral, n°11, p.:125-141, Santa Fe, Argentina.
- IRIONDO, M., 1987.
Geomorfología y Cuaternario de la Provincia de Santa Fe (Argentina).
D'Orbignyana 4: 1-54.
- KOWALCZYK, S., MASLAKOWSKI, M., TUCHOLKA, P. 2014.
Determination of the correlation between the electrical resistivity of non-cohesive soils and the degree of compactation.
Journal of Applied Geophysics 110, 43-50.
- KUMARI SUDHA, ISRAIL, M., MITTAL, S., RAI, J. 2009.
Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations.
Journal of Applied Geophysics 67, 74 - 79.
- MARENGO, H. 2002.
La transgresión de Laguna Paiva: distribución y problemas estratigráficos.
15° Congreso Geológico Argentino Actas 1: 637-642, Buenos Aires.
- MÁRSICO, D. 2013
Aportes a la perspectiva geológica e hidrogeológica regional en el sector centro este de la Cuenca Chacoparanaea.
Universidad de La Coruña, Tesis de doctorado, (Inédita) pp 209, La Coruña, Galicia, España.
- MUÑOZ, L., TREPO O., CALVO C., 2010.
Recuperación de canteras en la región centro este de la provincia de Entre Ríos.
Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente. Vol N° 24 pag 25-33., Córdoba, Argentina.
- REIG, O., 1956.
Sobre la posición sistemática de "Zygolestes paranensis" Amegh. y de "Zygolestes entrerrianus" Amegh.
Centro de Estudiantes del Doctorado en Ciencias Naturales de Buenos Aires Revista Holmbergia 5 (12-13): 209-226, Buenos Aires
- ROSSI A., 2012.
Aspectos de la Contaminación con Nitratos en el Agua Subterránea de la Ciudad de Concordia, Entre Ríos.
Trabajo Final Especialista en Ingeniería Ambiental Facultad Regional Concordia, Universidad Tecnológica Nacional (Inédito). 165pp
- SILVA BUSSO A. MACHADO P. Y COSENTINO J., 2011.
Propuesta de control de las estructuras del subsuelo sobre la geología Terciario-Cuaternaria y su relación con la geomorfología fluvial en la Provincia de Entre Ríos, Argentina.
Convenio UTN (Concordia) - YPF, Universidad Tecnológica Nacional FRCON. Informe final Inédito. 245pp:.
- SILVA BUSSO A. Y AMATO S., 2013.
Posibilidades de Explotación y Demanda Hídrica sobre el Acuífero Ubajay en el Sector Oriental de la Provincia de Entre Ríos,
Congreso Nacional del Agua XXIV CONAGUA 2013, San Juan, Argentina. Actas en CD.
- SILVA BUSSO A. Y AMATO S., 2017.
Depósitos fluviales del plio-pleistoceno-holoceno de la Provincia de Entre Ríos y sus Implicancias Hidrogeológicas.
Revista de la Asociación Geológica Argentina, Rev. Asoc. Geol. Argent. Vol. 74 (3): 338 - 356.

SILVA BUSSO, A. 1999.

Contribución al conocimiento geológico e hidrogeológico del Sistema Acuífero Termal de la Cuenca Chacoparanense Oriental argentina.

Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Tesis de doctorado, Buenos Aires pp:574.

SILVA BUSSO, A. Y C. FERNANDEZ GARRASINO 2004.

Presencia de las Formaciones Piramboia y Botucatu (Triásico - Jurásico) en el subsuelo oriental de la Provincia de Entre Ríos.

Asociación Geológica Argentina Revista 59 (1): 141-151, Buenos Aires

TÓFALO, O., 1986.

Caracterización sedimentológica y estratigrafía de las Formaciones Puerto Yerúa y Arroyo Avalos, provincias de Entre Ríos y Corrientes.

Tesis doctoral inédita Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la UBA, Buenos Aires, Argentina. 221pp.