



Variabilidad estadística de las propiedades generales y microelementos en un transecto de un suelo de viñedo

Statistical variability of general properties and microelements along a transect of a soil under vineyard

Irene VARELA VILA¹, Antonio PAZ GONZÁLEZ¹, Marcos LADO LIÑARES¹, Eva VIDAL VÁZQUEZ^{1*}, Gabriela Cristina SARTI^{1,2}

¹ Grupo AQUATERRA, Centro Interdisciplinar de Química e Bioloxía (CICA), Universidade da Coruña (UDC), A Coruña, España

² Cátedra de Química Analítica e Inorgánica, Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires (UBA), Buenos Aires, Argentina

*Autor de contacto: eva.vidal.vazquez@udc.es

<https://doi.org/10.17979/cadlaxe.2024.46.11400>

received: 23/11/2024 accepted: 16/12/2014

Abstract

Soil properties may exhibit an important spatial variability between neighboring samples. In agricultural soils, there is a need to assess the presence of potential limiting factors and their variability. The aim of this work was to evaluate the statistical variability of the main soil general properties and micronutrients of a vineyard soil from samples collected along a small transect. On this transect, which was located on a field from the Ribeiro Origin Determination, 65 soil samples were taken at a between-sample distance of 0.8 m. The general soil properties studied were texture, pH, organic matter content and exchange complex attributes. In additions, total concentrations and available concentrations extracted by Mehlich 3 and DTPA solutions of four micronutrients, namely Fe, Mn, Cu and Zn, were also determined. The soil texture ranged from loamy to sandy loam. Mean soil pH was 5.30, mean organic matter content was 2.31% and mean cationic exchange capacity was 7.56 cmol₍₊₎kg⁻¹ of soil. The coefficients of variation of sand, silt and clay fractions, pH, organic matter and cation exchange capacity were smaller than 10% and were classified as low, however the remaining soil properties showed CVs ranging from 10% to 20% and were classified as medium. The concentrations of total micronutrients

and available micronutrients extracted with Mehlich 3 ranked as: $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Zn}$, while concentrations extracted with DTPA ranked as: $\text{Fe} > \text{Cu} > \text{Mn} > \text{Zn}$. Copper accumulation was found to be the main limiting factor for wine production. Moreover, an imbalance of the Mg/K ratio in segments of the transect was evidenced. The pH and organic matter content showed relatively low values and therefore liming and increasing use of organic manures are recommended. Summarizing, the used experimental design allowed to evaluate soil quality state and to recognize the soil properties that act as production limiting factors.

Keywords: vineyard soil, fertility status, nutrient availability, limiting factors, copper accumulation

Resumen

Las propiedades del suelo pueden presentar una importante variabilidad espacial entre muestras vecinas. En los suelos agrícolas es necesario evaluar la presencia de potenciales factores limitantes de la producción y la variabilidad de los mismos. En este trabajo se analizó la variabilidad estadística de las principales propiedades generales y micronutrientes en un suelo de viñedo, a lo largo de un transecto de pequeñas dimensiones. En dicho transecto, ubicado en una finca de la Denominación de Origen Ribeiro, se tomaron 65 muestras, a intervalos de 0,8 m. Se estudiaron las siguientes propiedades generales: textura, pH, materia orgánica y atributos del complejo de cambio. Además, se analizaron las concentraciones totales y las extraídas con las soluciones Mehlich 3 y DTPA de los micronutrientes Fe, Mn, Cu y Zn. La textura osciló entre franca y franco-arenosa. Se obtuvo un pH medio de 5,30, un contenido medio en materia orgánica de 2,31% y una capacidad de intercambio catiónico media de 7,56 $\text{cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$. Los coeficientes de variación (CV) de las fracciones arena, limo y arcilla, el pH, la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico se consideran bajos, con valores inferiores al 10 %, mientras las restantes propiedades presentaron CVs medios, inferiores al 20%. Las concentraciones de micro elementos totales y extraídos con Mehlich 3 decrecieron de acuerdo con la secuencia: $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Zn}$; sin embargo, tras la extracción con DTPA se ordenaron de acuerdo con: $\text{Fe} > \text{Cu} > \text{Mn} > \text{Zn}$. Se comprobó que la acumulación de Cu es el principal factor limitante para la producción vitícola. Además, se puso en evidencia un desequilibrio de la relación Mg/K en algunos segmentos del transecto. El pH y la materia orgánica presentaron valores relativamente bajos, si bien no se consideran limitante, por lo que se recomienda corregir la acidez e incrementar el uso de abonos orgánicos. En definitiva, el diseño experimental empleado permitió evaluar el estado del suelo de viñedo estudiado y conocer las propiedades edáficas que pueden actuar como barreras que limitan la producción.

Palabras clave: suelo de viñedo, nivel de fertilidad, disponibilidad de nutrientes, factores limitantes, acumulación de cobre

1. INTRODUCCIÓN

La vid puede cultivarse en una amplia variedad de tipos de suelo, de textura arenosa, arcillosa e incluso en suelos pedregosos, con diferentes profundidades y pendientes, dentro de cierta gama de niveles de fertilidad. Con todo, son numerosas las propiedades físicas, químicas y biológicas de las que depende la productividad y fertilidad de los suelos de viñedo y que pueden limitar potencialmente la producción de los mismos. En términos generales un suelo ideal para el viñedo consta de horizontes superficiales y subsuperficiales que le proporcionan profundidad adecuada, retienen suficiente agua, presenta buenas condiciones de drenaje y un contenido óptimo en elementos nutritivos (CESCO *et al.*, 2021; VÁZQUEZ-BLANCO *et al.*, 2023).

Numerosos estudios han puesto en evidencia la acumulación de metales en suelos agrícolas, debido a intervenciones habituales como la fertilización y el uso de pesticidas. La aplicación año tras año de fungicidas basados en Cu en la viticultura tradicional, como el caldo bordelés que consiste en una mezcla sulfato de cobre y cal hidratada, ha causado un aumento considerable de la concentración de este elemento en los suelos de viñedo. Algunos fungicidas usados más recientemente incluyen cantidades variables de Zn, que pueden ser minoritarias o mayoritarias con respecto al Cu. El uso de abonos orgánicos, en particular los procedentes de granjas de porcino puede aportar cantidades adicionales de Zn y Cu al suelo (VARELA VILA, 2022). Por tanto, con el tiempo, los suelos de viñedo de buena calidad pueden irse deteriorando debido a la acumulación de elementos como Cu y Zn, que forman parte de los fungicidas y los abonos orgánicos. En Galicia se han encontrado valores medios de Cu total y Cu disponible que superan los límites por encima de los cuales puede existir riesgos de toxicidad para el cultivo (ARIAS *et al.*, 2004; FERNÁNDEZ CALVIÑO *et al.*, 2008, 2009; VARELA VILA, 2002; VÁZQUEZ-BLANCO *et al.*, 2003). La utilización excesiva de fertilizantes orgánicos puede dar lugar también a una sobreabundancia de fósforo en el suelo (VARELA VILA, 2022; VÁZQUEZ-BLANCO *et al.*, 2023).

Desde hace varias décadas, se ha comprobado que las propiedades del suelo pueden presentar una importante variabilidad espacial, incluso a pequeñas distancias, (TRANGMAR *et al.*, 1985; PAZ GONZÁLEZ *et al.*, 1996, 2000; CARIDAD-CANCELA *et al.*, 2005; PAZ-FERREIRO *et al.*, 2016; VARELA VILA *et al.*, 2023), lo que puede ser debido a la interacción entre los factores y procesos de formación del suelo por un lado y al uso y manejo del mismo, por otro lado. La variabilidad espacial tiene implicaciones sobre el sistema de muestreo del suelo. De este modo, en las últimas décadas se han implementado cada vez con mayor frecuencia muestreos basados en redes regulares de dos dimensiones con el fin de llevar a cabo análisis geostadísticos y/o implementar técnicas de agricultura de precisión que permiten realizar intervenciones agronómicas específicas (PAZ GONZÁLEZ *et al.*, 2000; DAFONTE *et al.*, 2010; GARCÍA-TOMILLO *et al.*, 2017). En la Comunidad Autónoma de Galicia, la variabilidad espacial de los suelos de cultivo ha sido estudiada a diferentes escalas, usando redes bidimensionales que abarcan desde superficies inferiores o del orden de un área (VARELA VILA *et al.*, 2022; PAZ GONZÁLEZ *et al.*, 2000; FERNÁNDEZ

CALVIÑO *et al.*, 2013) hasta otras de varias hectáreas (ULLOA GUITIÁN *et al.*, 2001; CARIDAD-CANCELA *et al.*, 2005; GARCÍA TOMILLO *et al.*, 2017).

Aunque para el estudio de la variabilidad espacial se emplea con mayor frecuencia el muestreo en redes bidimensional, unos pocos autores han usado transectos con este fin. (Mc BRATNEY y WEBSTER, 1981; GARCÍA-TOMILLO *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2021). En definitiva, independientemente del tipo de muestreo, conocer la variabilidad de las propiedades generales y el contenido en micronutrientes de los suelos permite manejar y fertilizar los mismos de manera óptima y más específica. En base a las anteriores consideraciones, se seleccionó un transecto con una longitud del orden de magnitud de la que presentan las parcelas tradicionales de reducidas dimensiones comunes en la Denominación de origen (D.O.) de O Ribeiro, en el que se tomaron muestras en puntos situados a distancias cortas. En estas muestras se determinaron propiedades generales como textura, pH, materia orgánica y atributos del complejo de cambio, así como contenidos en Fe, Mn, Cu y Zn obtenidos tras extracción con ácido nítrico y las soluciones Mehlich 3 y DTPA 0,005M. Por tanto, Los objetivos de este trabajo consisten en: 1) analizar la variabilidad estadística de las propiedades generales y el contenido en micronutrientes totales y disponibles de un suelo de viñedo a lo largo de un transecto de pequeñas dimensiones y 2) evaluar la presencia o ausencia de limitaciones relacionadas con la calidad química del suelo para el cultivo del viñedo.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Localización del transecto y muestreo del suelo

En el presente trabajo el muestreo se llevó a cabo en la finca experimental de la Estación de Viticultura y Enología de Galicia (EVEGA), en la comarca del Ribeiro de Avia. Dicha área experimental se localiza en el municipio de Leiro, provincia de Ourense, Galicia (latitud: 42° 21,62' N, longitud: 8° 7,02' W, y altitud 100 m) y ha sido descrita previamente (VARELA VILA *et al.*, 2023). El clima es de tipo templado-húmedo, atlántico, si bien cierto presenta carácter de transición al clima mediterráneo. La temperatura media anual se cifra en 13,5°C y la precipitación media anual es de 1247,82 mm. El material de partida es granítico. El suelo se clasifica como Inceptisol, según Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 2022) y como Umbrisol húmico según la base referencial mundial del recurso suelo (IUSS-WRB, 2022).

Se tomaron 65 muestras de suelo, entre 0 y 0,20 m de profundidad, a lo largo de un transecto de 52 m de longitud, siendo la separación entre muestras vecinas de 0,8 m. Dicho transecto se estableció en el centro de una calle ubicada entre dos hileras de vides, de modo que quedó bordeada por las dos rodadas de tractor visibles en la mencionada calle. La profundidad de muestreo fue de 0,0-0,2 m.

2.2 Análisis de las propiedades generales del suelo

El análisis granulométrico se llevó a cabo mediante la técnica descrita por GUITIÁN y CARBALLAS (1976) que combina el tamizado con la sedimentación, usando una pipeta

Robinson. El pH se determinó en una solución suelo: agua (1: 2,5) tras 10 minutos de reposo, usando un pH-metro de laboratorio (Crison 2000, España), según GUITIÁN y CARBALLAS (1976). La materia orgánica (MO) se determinó de acuerdo con el método de Walkley-Black, descrito en GUITIÁN y CARBALLAS (1976). La extracción de fósforo disponible se llevó a cabo mediante una solución de intercambio de aniones (VAN RAIJ *et al.*, 2001) y posteriormente la determinación se efectuó por espectroscopia. Los cationes de cambio Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} se obtuvieron usando una resina de intercambio catiónico según el método descrito por VAN RAIJ (2001). Una vez extraídos dichos cationes, se determinaron por adsorción atómica. Asimismo, la acidez potencial (H^{+} Al^{3+}) se determinó en solución de KCL, según VAN RAIJ (2001). La suma de bases de cambio (SB), se obtuvo como el sumatorio de los cationes de cambio, de acuerdo con $\text{SB} = \text{Ca}^{2+}$, Mg^{2+} y K^{+} , que a su vez se determinaron mediante extracción con resina de intercambio catiónico. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se obtuvo a partir de la suma de bases de cambio y la acidez de cambio, según $\text{CIC} = \text{SB} + (\text{H}^{+} \text{Al}^{3+})$.

2.3. Análisis de microelementos totales y biodisponibles

La concentración de micro elementos totales se obtuvo tras digestión ácida en un horno de microondas. La digestión se efectuó mediante HNO_3 concentrado (65%), según el método US-EPA-SW_846 3501 en un horno microondas (CEM MDS-2000) con potencia de 600W. Por otro lado, se llevaron a cabo extracciones de micro elementos biodisponibles usando las soluciones Mehlich-3 y DTPA, siguiendo el procedimiento descrito en ABREU *et al.* (2002) y VIDAL-VÁZQUEZ *et al.* (2005). La solución Mehlich-3 es una mezcla de ácidos (0,2 M CH_3COOH , 0,25 M NH_4NO_3 , 0,015M NH_4F , 0,013 HNO_3) con un agente quelante (0,001 EDTA) a pH 2,5 que permite extraer cantidades de nutrientes de la solución en posiciones intercambiables y asociada a la materia orgánica (MEHLICH, 1984). Para efectuar la extracción, se tomaron 5 cm³ de tierra fina a los que se añadieron 20 ml de la solución Mehlich-3. A continuación, se agitaron durante 5 minutos en un agitador horizontal con movimiento circular. Se filtró la suspensión y el filtrado se guardó a 4° C hasta su medición.

La solución extractante DTPA está compuesta por ácido dietilenotriaminopentaacético (DTPA 0,005 M), trietanolamina (TEA 0,1 M) y cloruro de calcio (CaCl_2 0,01M) a pH 7,3 (LINDSAY and NORWELL, 1978). Para llevar a cabo la extracción se agitaron 10 g de suelo con 20 mL de solución extractante en un agitador horizontal durante 2 horas. Posteriormente, se filtró la suspensión y el extracto se almacenó a 4° C. La determinación de Fe, Mn, Cu y Zn obtenidos mediante el empleo de las dos soluciones extractantes se efectuó mediante ICP-AES, usando un equipo Jobin Yvon JY 50-P (CARIDAD-CANCELA *et al.*, 2005; VIDAL-VÁZQUEZ *et al.*, 2005).

2.4. Criterios para evaluar la calidad química del suelo para el cultivo de viñedo

Los criterios empleados para la evaluación de la calidad química del suelo se basan en un modelo de aptitud agronómica de los suelos (Soil Fertility Capability Classification propuesto por SÁNCHEZ *et al.*, (2003). Este modelo ha sido empleado anteriormente con algunas modificaciones en Galicia para diferentes usos agrícolas y forestales del suelo

(CALVO y MACÍAS, 1992) y más recientemente viñedos (VÁZQUEZ-BLANCO *et al.*, 2023).

Los principales factores que se tuvieron en cuenta para evaluar el estado de fertilidad química a partir del análisis de las propiedades generales y la disponibilidad de micronutrientes fueron: acidez, carácter álico, contenido en materia orgánica total, contenido en fósforo disponible, capacidad de intercambio catiónico, contenido de calcio de cambio, reservas de potasio y equilibrio de potasio, contenido de magnesio y equilibrio de las relaciones Ca/Mg y K/Mg, contenido en Cu disponible y contenido en Zn disponible. No se dispone de datos de contenido en nitrógeno total, por lo que no se pudo valorar esta propiedad.

2.5. Análisis estadístico

Se llevó a cabo un análisis estadístico elemental, evaluando los valores medios, mínimos, máximos, así como la desviación estándar, el coeficiente de variación (CV), la asimetría y la curtosis. Como medidas de posición se presentan los valores medios que permiten conocer la tendencia central, así como los mínimos y máximos, que permiten conocer el rango de oscilación de una propiedad. La desviación estándar es una medida que da idea de la dispersión de los datos con respecto a su media aritmética. El coeficiente de variación (CV) es una medida de variabilidad relativa que relaciona la desviación estándar de un conjunto de muestras con su media. El coeficiente de asimetría cuantifica en qué medida las observaciones de un conjunto de datos se distribuyen simétricamente alrededor de la media. El coeficiente de curtosis mide el grado de apuntamiento de una distribución con respecto a la distribución normal con la misma media y varianza. La variabilidad se considera baja para valores de CV inferiores a 10%, media para valores en el rango entre 10% y 25% y alta para valores mayores de 30% (CAMBARDELLA *et al.*, 1994).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Propiedades generales

En la Tabla 1 se resume la estadística descriptiva de las propiedades generales del suelo. Con respecto a la granulometría, del conjunto de las 65 muestras estudiadas, 38 presentaron textura franca y 27 textura franco-arenosa. Los datos medios indican que la fracción arena es mayoritaria con un 52,3% seguida del limo con un 32,4% y de la arcilla con un 15,3%. El rango de oscilación entre los valores máximos y mínimos de las tres fracciones texturales es escaso, de modo que el contenido de arena varía entre 49,7% y 55,2%, el de limo entre 30,00% y 34,5% y el de arcilla entre 13,9% y 17,5%. En consecuencia, los coeficientes de variación son bajos, es decir inferiores al 10%, para las tres fracciones texturales, ya que suponen 2,5% para la arena, 2,71% para el limo y 5,70 % para la arcilla.

Como cabría esperar en un suelo desarrollado sobre un material de partida granítico, el pH presenta valores inferiores a la neutralidad, con una media de 5,3 y un rango que va

de 4,9 a 5,4. Solamente dos de las muestras estudiadas se clasifican como muy fuertemente ácidas ($\text{pH} \leq 5,9$), mientras que las 63 muestras restantes resultaron ser fuertemente ácidas ($5,0 \leq \text{pH} \leq 5,5$). En viñedos de la Comunidad Autónoma de Galicia, y para la misma profundidad de muestreo, ARIAS *et al.*, (2004) obtuvieron valores de pH que estaban comprendidos entre 3,9 y 6,0. En la localidad de Arnoia, también dentro de la D.O. Ribeiro, FERNÁNDEZ CALVIÑO *et al.* (2008) tomaron 34 muestras en una pequeña parcela de viñedo, obteniendo un rango de valores de comprendidos entre 5,6 y 6,2, con una media de 5,9. En un estudio realizado durante tres años en la D.O. Rias Baixas se encontraron valores más elevados de pH, ligeramente ácidos o neutros (VÁZQUEZ-BLANCO *et al.*, 2023). El C.V del pH se cifra en 2%, siendo el más bajo de todas las propiedades generales estudiadas. Esto concuerda con los resultados de otros trabajos sobre variabilidad espacial, en los que se puso de manifiesto el menor coeficiente de variación del pH, con respecto a otras propiedades (PAZ GONZALEZ *et al.*, 1996, 2000; VARELA VILA *et al.*, 2023, VÁZQUEZ-BLANCO *et al.*, 2023).

El valor medio de la MO ascendió a 2,35%, mientras que los valores mínimos y máximos fueron de 2% y 2,7%, respectivamente. ARIAS *et al.* (2004) encontraron valores de MO en suelos de viñedo de Galicia comprendidos entre 0,1% y 5,7%, tomando las muestras a la misma profundidad (0-0,2 m) que en este trabajo. En una parcela de pequeñas dimensiones el contenido en MO presentó un valor medio de 2,06% con mínimos y máximos de 1,55% y 2,58%, respectivamente (FERNÁNDEZ CALVIÑO *et al.*, 2008). Por tanto, si bien los valores de MO medidos en Leiro pueden considerarse bajos para el conjunto de los suelos de la Comunidad Autónoma de Galicia (INGARAMO *et al.*, 2007), son normales para los suelos de viñedo. En todo caso, el contenido en MO se sitúa por encima del nivel considerado crítico (2%); por debajo de este umbral la calidad del suelo puede estar comprometida. El CV de la MO fue del 7,2%, por lo que, si bien es más elevado que el encontrado para pH, arena y limo, aún se considera como muy bajo.

Tabla 1. Estadística descriptiva de las propiedades generales del suelo medidas a lo largo del transecto (n=65).

	Media	Mínimo	Máximo	σ *	C.V.	Asimetría	Curtosis
Arena (%)	52,30	49,70	55,20	13,00	2,50	0,22	-0,73
Limo (%)	32,40	30,00	34,50	8,78	2,71	-0,80	1,32
Arcilla (%)	15,30	13,90	17,50	8,70	5,70	0,32	-0,67
pH	5,30	4,90	5,40	5,10	2,00	-1,12	2,00
MO (%)	2,35	2,00	2,70	1,70	7,20	-0,05	-0,24
P (mgkg⁻¹)	70,2	47,0	101,0	13,37	19,04	-0,49	-0,70
Ca (cmol+kg⁻¹)	2,92	2,00	4,00	4,10	14,10	-0,11	0,02
K (cmol+kg⁻¹)	0,76	0,43	1,00	1,30	17,50	-0,55	-0,37
Mg (cmol+kg⁻¹)	1,15	0,90	1,50	1,40	12,50	0,57	-0,23
S.B (cmol+kg⁻¹)	4,83	3,44	6,35	6,40	13,20	-0,11	-0,19
H+Al (cmol+kg⁻¹)	2,73	2,20	3,40	3,00	10,90	-0,16	-0,70
CIC (cmol+kg⁻¹)	7,56	6,24	8,85	6,30	8,30	-0,23	-0,58
V (%)	63,70	55,00	73,00	4,50	7,10	0,09	-0,86

σ : Desviación típica, C.V.: coeficiente de variación

El fósforo disponible extraído con resina de intercambio aniónico mostró un valor medio de 70.2 mg.kg^{-1} y varía entre un mínimo de $47,0 \text{ mg.kg}^{-1}$ y un máximo de $107,0 \text{ mg.kg}^{-1}$. El CV asciende a 19,04%, siendo el más elevado de las propiedades generales, aunque se tipifica como medio. Se admite que el valor óptimo de fósforo fácilmente disponible, medido tras extracción con resina, se encuentra en el intervalo entre 40 y 60 mg.kg^{-1} . Por tanto, parte de las muestras medidas en el transecto presentan contenidos excesivos de fósforo. Los contenidos de fósforo total presentaron una media de $540,82 \text{ mg.kg}^{-1}$ y varían entre $350,43 \text{ mg.kg}^{-1}$ y $787,2 \text{ mg.kg}^{-1}$; la media de las formas de fósforo extraídas con Mehlich 3 ascendió a $246,94 \text{ mg.kg}^{-1}$ siendo el mínimo $214,63 \text{ mg.kg}^{-1}$ y el máximo $357,27 \text{ mg.kg}^{-1}$. Estos resultados confirman los niveles muy altos de fósforo en el transecto estudiado. La extracción con Mehlich-3 proporcionó valores de este elemento aproximadamente 3,5 veces superiores a los obtenidos tras la extracción con resina de intercambio catiónico; asimismo se obtuvo una buena correlación entre los valores determinados por ambos métodos, con un coeficiente de determinación de la regresión de $P_{\text{Mehlich-3}}$ frente a P_{resina} de 0,83.

El valor medio de la CIC ascendió a $7,56 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$, el mínimo fue de $6,24 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$ y el máximo de $8,85 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$. Estos valores son relativamente bajos y concuerdan con el alto contenido de arena y los niveles bajos de MO de las muestras estudiadas (VARELA VILA, 2022). Entre las bases de cambio, el Ca^{2+} es el catión más abundante, seguido de Mg^{2+} y K^{+} . En todas las muestras estudiadas, la suma de las tres bases de cambio analizadas ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^{+}$) es más alta que la acidez de cambio ($\text{H}^{+} + \text{Al}^{3+}$); en consecuencia, el porcentaje de saturación de bases (V) es siempre superior al 50%, con un valor medio de 63,7% y un rango de oscilación entre 55,0% y 73,0%. Entre las bases de cambio, el Ca^{2+} es el catión más abundante, seguido de Mg^{2+} y K^{+} . Los coeficientes de variación de C.I.C. (8,3%) y V (7,1%) presentaron valores próximos al CV de la MO e inferiores a los de la acidez de cambio (10,9%), SB (13,2%), Mg^{2+} (12,5%), Ca^{2+} (14,1%) y K^{+} (17,5%). En consecuencia, los CV de CIC, V y acidez de cambio se tipifican como bajos, mientras que los de SB, Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} de cambio se clasifican como medios.

3.2. Micro elementos totales y disponibles

En la Tabla 2 se consignan los parámetros estadísticos de los micronutrientes Fe, Mn, Cu y Zn totales y extraídos con las soluciones Mehlich 3 y DTPA. Las concentraciones medias de Fe, Mn, Cu y Ni totales ascendieron a $19907,29 \text{ mg.kg}^{-1}$, $5565,86 \text{ mg.kg}^{-1}$, $101,65 \text{ mg.kg}^{-1}$ y $57,61 \text{ mg.kg}^{-1}$, respectivamente. Los coeficientes de variación de estos elementos a lo largo del transecto aumentan de acuerdo con $\text{Mn} < \text{Fe} < \text{Cu} < \text{Zn}$, siendo bajos ($< 10\%$) para los tres primeros elementos y medios ($< 20\%$) para Zn. Las concentraciones de Cu total son muy superiores a los valores de fondo que cabe esperar en la zona estudiada, de litología granítica y que se cifran en $9,8 \text{ mg.kg}^{-1}$. Por el contrario, la concentración media de Zn total es del mismo orden de magnitud que la de los valores de fondo en materiales graníticos del área estudiada, que se cifra en $50,9 \text{ mg.kg}^{-1}$ (MACÍAS VÁZQUEZ y CALVO de ANTA, 2009). Estos resultados permiten establecer que los niveles de Cu pueden ser excesivos, como consecuencia de aportes externos; sin

embargo, el potencial impacto de estos aportes en los niveles de Zn, sería poco importante.

El contenido total de metales pesados en el suelo se utiliza habitualmente como un indicador para establecer valores de niveles de fondo o niveles de referencia. Este atributo del suelo no es representativo en el estudio de la contaminación por metales pesados, pero pone de manifiesto si la muestra presenta concentraciones elevadas de los mismos. Por tanto, el contenido total de un metal en el suelo, resulta un indicador poco representativo de su toxicidad y disponibilidad (FERNÁNDEZ MARCOS, 2011).

Tabla 2. Estadística descriptiva de las concentraciones de micro elementos totales y extraídos con las soluciones Mehlich 3 y DTPA (n=65).

	Media	Mínimo	Máximo	σ *	C.V.	Asimetría	Curtosis
mg.kg ⁻¹				(%)			
Concentraciones totales							
Fe	19907,29	16821,53	24404,87	1552,07	7,24	0,08	-0,19
Mn	5565,86	399,63	805,73	98,03	2,05	0,43	-0,63
Cu	101,65	82,01	118,75	9,03	8,26	-0,12	-0,74
Zn	57,61	44,48	102,69	8,66	15,29	2,40	10,63
Concentraciones extraídas con la solución Mehlich 3							
Fe	386,28	330,22	442,16	27,11	7,02	0,086	-0,591
Mn	129,64	84,22	183,33	25,46	19,64	0,061	-1,13
Cu	51,63	44,96	61,79	3,59	6,97	0,353	-0,23
Zn	4,01	2,83	4,71	0,39	9,89	-0,482	-0,12
Concentraciones extraídas con la solución DTPA							
Fe	57,29	44,00	72,00	5,90	10,43	0,27	-0,15
Mn	9,68	5,40	15,70	1,60	17,47	0,75	2,21
Cu	25,69	21,50	29,60	2,10	8,25	-0,06	-0,78
Zn	1,42	0,90	1,80	0,17	12,03	-0,23	0,20

σ : Desviación típica, C.V.: coeficiente de variación

Las diferentes formas en las que un elemento nutritivo se encuentra dentro del suelo proporcionan mayor información sobre la movilidad y por lo tanto sobre la disponibilidad para la planta. En este sentido, se admite que resulta muy difícil encontrar una solución extractante que represente la capacidad de absorción de las raíces de las plantas. En este trabajo se emplearon las soluciones Mehlich 3 y DTPA 0,005 M para caracterizar los contenidos de micro elementos en el suelo disponibles para la planta. En términos aproximados, el poder de extracción de la solución Mehlich 3 es superior al de DTPA 0.005M. Asimismo, se considera que las formas químicas extraídas con DTPA están fácilmente disponibles para la vegetación, mientras que las cantidades adicionales extraídas con Mehlich constituyen reservas de nutrientes que solo pueden estar disponibles a medio (ABREU *et al.*, 2002; VIDAL VÁZQUEZ *et al.*, 2005).

Las concentraciones medias de Fe, Mn, Cu y Zn extraídas con Mehlich 3 ascendieron a 386,28 mgkg⁻¹, 126,64 mgkg⁻¹, 51,60 mgkg⁻¹ y 4,01 mgkg⁻¹, respectivamente. Los coeficientes de variación fueron bajos para Fe, Cu y Zn y medios para Mn. Como cabe esperar, las concentraciones de Fe, Mn, Cu y Zn extraídas con DTPA 0,005M fueron inferiores a las obtenidas con Mehlich 3 y se cifraron en 57,29 mgkg⁻¹, 9,68 mgkg⁻¹, 27,69

mgkg⁻¹ y 1,42 mgkg⁻¹, respectivamente; en este caso, los coeficientes de variación fueron bajos para Cu e intermedios para Fe, Mn y Zn. Atendiendo a los resultados de la extracción con DTPA, y de acuerdo con la clasificación establecida por ABREU *et al.*, (2005), las concentraciones de Cu en el transecto se consideran excesivas, ya que se sitúan por encima de 16 mgkg⁻¹, Según el mismo criterio, las concentraciones de Zn entran en las categorías de medias (0.6 a 1,2 mgkg⁻¹) o altas (1,2 a 2,4 mgkg⁻¹)

Tanto las concentraciones totales de estos micronutrientes como las extraídas con Mehlich 3 de estos micronutrientes se ordenaron de acuerdo con el siguiente orden: Fe > Mn > Cu > Zn. Sin embargo, las concentraciones extraídas con DTPA siguieron el orden: Fe > Cu > Mn > Zn, lo que pone en evidencia la abundancia del Cu fácilmente disponible (Tabla 2, Figura 1). Se comprueba que la solución Mehlich 3 proporciona concentraciones de Fe que son más de 6 veces superiores a las obtenidas con DTPA 0.005M, mientras que el Mn extraído con Mehlich 3 resultó ser más de 12 veces superior al extraído con DTPA. Para el Cu la relación entre las concentraciones Cu_{Mehlich 3} / Cu_{DTPA} fue próxima a 2 y algo superior a este valor, mientras que la relación Zn_{Mehlich 3} / Zn_{DTPA} fue mayor que 6.

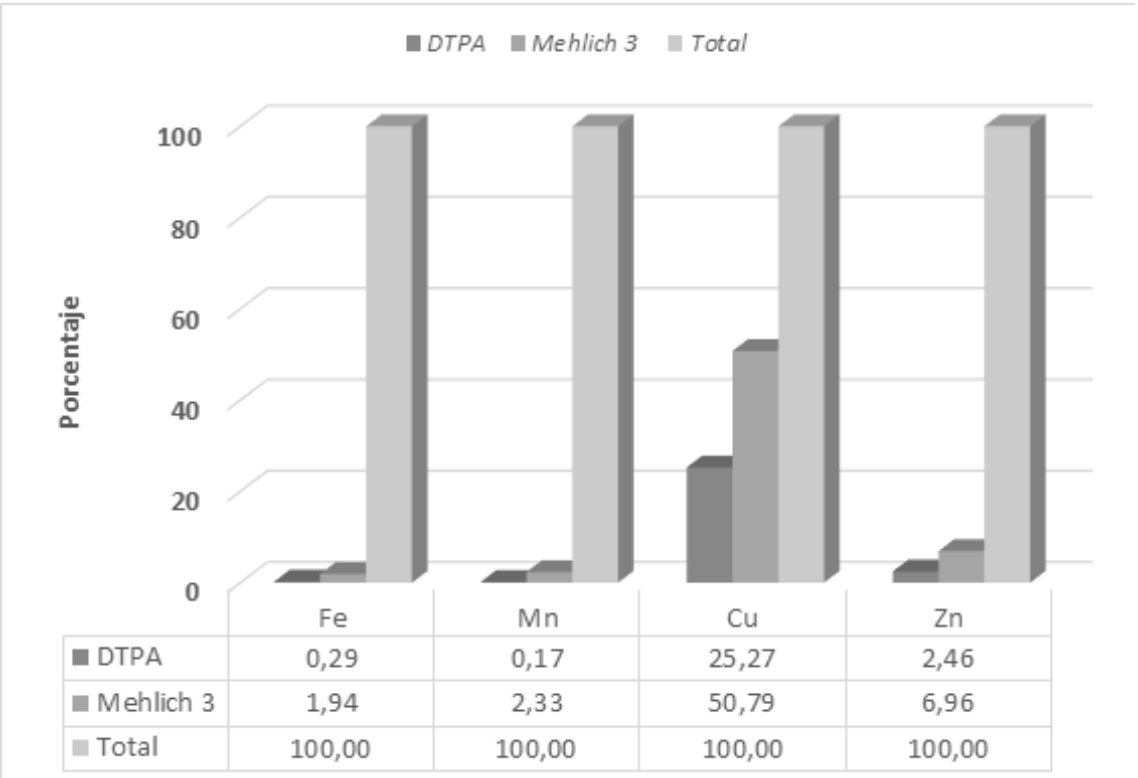


Figura 1. Porcentaje extraído tras el uso de las soluciones Mehlich 3 y DTPA de cada uno de los elementos en relación a la concentración total.

En la Figura 1 se muestra el porcentaje extraído tras el uso de las soluciones Mehlich 3 y DTPA de cada uno de los elementos en relación a la concentración total. Se comprueba que para Fe y Mn las extracciones con Mehlich 3 y DTPA 0.005 libera cantidades que son inferiores al 2,4% y 0,30% del total, respectivamente. Estas proporciones tan bajas

de elementos liberados probablemente provienen exclusivamente de la alteración del material de partida. En el caso del Cu, sin embargo, Las soluciones Mehlich 3 y DTPA extraen 50,79% y 25,27% del total respectivamente, lo que sugiere la abundancia de fracciones biodisponibles de este elemento que no proceden de la alteración, sino que han sido aportadas por acciones antrópicas. Finalmente, para Zn las extracciones con Mehlich 3 y DTPA 0.005 M suponen 6,96% y 2,46 % del total; estos resultados sugieren la presencia de cierta cantidad de Zn en los aportes externos, si bien en una magnitud poco importante en relación al Cu.

Las fuentes externas de metales pesados en los viñedos de la D.O. Ribeiro han sido tradicionalmente los aportes orgánicos a base de estiércol y los fungicidas con compuestos de Cu. Más recientemente, el abonado con residuos orgánicos procedentes de granjas avícolas y de porcino han aportado compuestos con Zn; asimismo se ha ido incrementando el uso de pesticidas que contienen cantidades variables de Zn. En resumen, los aportes externos de metales pesados más abundantes han sido los de Cu, si bien se han añadido cantidades menores de Zn.

3.3. Evaluación de la fertilidad del suelo y factores limitantes de la misma

Desde el punto de vista de las propiedades y características físicas, además de las determinaciones granulométricas, se han podido observar atributos del suelo como la profundidad, la pedregosidad, así como la pendiente del terreno. En ausencia de pedregosidad supone que no existen limitaciones para el tráfico de la maquinaria agrícola. La profundidad del suelo es superior a un metro, lo que facilita un enraizamiento profundo y aumenta la disponibilidad de agua y nutrientes para la vid. La pendiente del terreno en el área estudiada es de orden de 2 a 3% y las hileras de la vid están dispuestas de forma perpendicular a la máxima pendiente, lo que supone que no existe un importante riesgo potencial de erosión.

La textura de las muestras tomadas a lo largo del transecto es muy poco variable y se sitúa en el límite entre las clases texturales franco-arenosa y franca. De la textura dependen propiedades importantes para el crecimiento de la vid como la superficie específica, la permeabilidad, la susceptibilidad a la compactación, la capacidad de retención y de almacenaje de agua y la disponibilidad de nutrientes. La permeabilidad y el riesgo de compactación en este tipo de textura no son limitantes. Por otro lado, de los resultados del análisis de textura cabe pronosticar que la superficie específica, la capacidad de intercambio catiónico y disponibilidad de nutrientes y la retención de agua se sitúen en niveles medios o bajos, sin que lleguen a ser limitantes; el incremento de materia orgánica mediante la fertilización y el manejo conservacionista del suelo debería de llevar aparejado el incremento en los valores de estas propiedades.

En base a los resultados de obtenidos para las propiedades generales (Tabla 1) y los micronutrientes (Tabla 2) se puede hacer un diagnóstico apropiado, aunque no completo, del estado nutritivo del suelo y la presencia o ausencia de factores limitantes desde el punto de vista químico. No obstante, dicho diagnóstico, aunque suficiente, podría estar

limitado por la ausencia de datos de algunas propiedades como el contenido en nitrógeno total y el aluminio de cambio.

El pH del suelo es ácido, con valores inferiores a 5,5 en todas las muestras estudiadas. Estos niveles de pH pueden suponer a priori la presencia de un factor limitante, ya que diversos autores (CESCO *et al.*, 2021; VÁZQUEZ-BLANCO *et al.*, 2023) han puesto de manifiesto que el pH óptimo en suelos de viñedo se encuentra en el rango $5,5 < \text{pH} < 8,5$. El uso del pH como un factor limitante de la fertilidad química va asociado a la presencia o ausencia de carácter álico, que está asociado a un porcentaje de saturación en Al mayor del 60%. En este trabajo no se determinó el Al de cambio; sin embargo, se dispone de la acidez de cambio ($\text{H}+\text{Al}$) que osciló entre 27% y 45%. A partir de este resultado se descarta el carácter álico de las muestras tomadas a lo largo del transecto. Dicho de otro modo, a pesar de valores de pH inferiores a 5,5, el porcentaje de saturación en bases (SB) de las 65 muestras estudiadas supera el 50%. En definitiva, agrónomicamente sería recomendable efectuar enmiendas para aumentar el Ph del suelo, si bien actualmente no parece ser un factor limitante.

Contenidos en materia orgánica inferiores a 2% se consideran deficitarios, mientras que los valores normales oscilan entre 2% y 5%. Por tanto, ninguna de las muestras tomadas a lo largo del transecto presenta déficit en materia orgánica, dado que los valores de esta propiedad oscilan entre 2% y 2,7%. No obstante, los porcentajes de materia orgánica son relativamente bajos, por lo que se recomienda añadir a corto plazo enmiendas en forma de estiércol o compost.

Por lo que respecta al fósforo los datos obtenidos con resina de intercambio catiónico indican niveles elevados que oscilan entre óptimos ($40\text{-}60 \text{ mg.kg}^{-1}$) y excesivos ($>60 \text{ mg.kg}^{-1}$). La extracción con Mehlich 3, que proporcionó valores superiores a 200 mg.kg^{-1} , pone en evidencia la sobreabundancia de este elemento, ya que se considera que contenidos en fósforo superiores a 70 mg.kg^{-1} extraídos con esta solución son indicadores de fertilización excesiva. El viñedo es un cultivo que mantiene la superficie del suelo desprovista de vegetación durante gran parte del año. Por tanto, en caso de génesis de escorrentía por procesos erosivos se puede producir la transferencia de cantidades importantes de fósforo desde la superficie del suelo hasta las aguas superficiales, con el consiguiente riesgo de eutrofización. En definitiva, una cantidad elevada de fósforo fácilmente disponible puede ser ventajosa para el cultivo, pero supone un riesgo para el medio ambiente, dado que puede provocar riesgos para el medio acuático.

Valores de CIC inferiores a $4 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$ se consideran limitantes. Sin embargo, los valores de CIC en el transecto oscilan entre 6,24 y $8,85 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$, lo que supone niveles moderados ($4 < \text{CIC} < 7$) o normales ($\text{CIC} > 7$). Hay que tener en cuenta que las bases de cambio se determinaron mediante resina de intercambio catiónico, técnica que proporciona valores inferiores a los obtenidos por otros métodos de extracción, como el método del acetato amónico. Los indicadores de deficiencia en Ca son un valor de este elemento en el complejo de cambio inferior a $1,5 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$, y una relación $\text{Ca/Mg} < 0,5$. El calcio de cambio oscila entre 2,0 y $4,0 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$, y la relación Ca/Mg entre 1,8 y 2,9, por lo que no se aprecian ni déficit ni desequilibrios en cuanto a este elemento nutritivo.

Se considera que existen deficiencias en K cuando el contenido en este elemento en el complejo de cambio es inferior a $0,2 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$, o bien cuando el mismo no supera el 2% de la CIC, cuando el valor de la misma es inferior a $10 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$. En el transecto estudiado, el primero de dichos indicadores es superior a $0,43 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$ y el segundo mayor que 6,7%, lo que pone de manifiesto que la disponibilidad de K es adecuada. En cuanto al Mg, se ha establecido que los niveles óptimos suponen un nivel del mismo en el complejo de cambio superior a $0,4 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$ y que las relaciones Ca/Mg y K/Mg no superen valores de 10 y 0,5, respectivamente. Todas las muestras del transecto presentan una buena disponibilidad de Mg y una adecuada relación Ca/Mg; sin embargo, la relación K/Mg varía entre 0,4 y 0,8, por lo que se detecten desequilibrios en dicha relación para algunos puntos de muestreo. Una relación K/Mg superior a 0,5 puede originar exceso de K en las hojas.

A lo largo de todo el transecto las concentraciones de Cu disponible presentaron poca variación, oscilando entre 21,50 y 29,60 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Ya se ha mencionado que, de acuerdo con ABREU *et al.*, (2005), concentraciones $> 16,0 \text{ mgkg}^{-1}$ son excesivas; otros autores (VÁZQUEZ-BLANCO *et al.*, 2023) consideran que contenidos de Cu_{DTPA} superiores a $25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, umbral que es superado en parte de las muestras, pueden ser tóxicos para la vid; . Asimismo, parte de las muestras superan el límite de $100 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$ de Cu total que también ha sido establecido como umbral de toxicidad (KABATA-PENDIAS y PENDIAS, 2001). Por tanto, todas las muestras del transecto contienen niveles excesivos de Cu. Asimismo, estos resultados ponen de manifiesto la movilización del Cu en el transecto estudiado, de modo que algunos segmentos del mismo ya han superado los umbrales de toxicidad de 25 mgkg^{-1} , y otros están próximos a dicho umbral.

Los niveles de Zn disponible se consideran deficientes por debajo de $0,60 \text{ mgkg}^{-1}$ y excesivos por encima de 15 mgkg^{-1} (ABREU *et al.*, 2005), mientras que concentraciones totales superiores a 500 mgkg^{-1} se consideran tóxicas (KABATA-PENDIAS y PENDIAS, 2001). Las concentraciones de Zn disponibles medidas a lo largo del transecto entran en las categorías de medias y altas, alejados tanto de los umbrales de deficiencia como de toxicidad, confirmando la adecuada disponibilidad de este elemento. Como ya se mencionó previamente, las concentraciones totales de Zn son bajas y del mismo orden de magnitud que los valores de fondo para materiales graníticos. Estos resultados son compatibles con pequeños aportes externos de Zn asociados a los abonos orgánicos o a los fungicidas, que se hayan podido producir en los últimos decenios.

4. CONCLUSIONES

El estudio de 65 muestras tomadas a lo largo de un transecto en un suelo de viñedo puso de manifiesto que la variabilidad estadística de pH, arena, limo, arcilla, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y porcentaje de saturación fue baja ($\text{CV} < 10 \%$), mientras que los de las bases de cambio, suma de bases y acidez potencial se clasificó como intermedia ($10\% < \text{CV} < 20\%$).

Las concentraciones totales de micronutrientes y las concentraciones obtenidas tras extracción con Mehlich siguieron el siguiente orden decreciente: Fe > Mn > Cu > Zn. Sin embargo, las concentraciones de micronutrientes fácilmente disponibles extraídas con DTPA presentaron la secuencia Fe > Cu > Mn > Zn. Estos resultados indican que la proporción de Cu fácilmente disponible con respecto al Cu total es mucho más elevada para el Cu que para los restantes microelementos estudiados.

Las características físicas del transecto estudiado no son limitantes para la producción. Dentro de las propiedades químicas generales se ha comprobado que los niveles disponibles de K, Ca y Mg son adecuados y que la relación Ca/Mg está equilibrada, mientras que se ha detectado una sobrefertilización en P, que puede suponer riesgos medioambientales. Sin embargo, la relación Mg/K es baja en algunos segmentos del transecto, lo que apunta a un desequilibrio que podría motivar una excesiva absorción por la planta. Los valores de pH y contenido en materia orgánica son bajos, si bien no parecen actuar como factores limitantes de la producción; en todo caso, la corrección de la acidez y las enmiendas orgánicas deberían de permitir mejorar la fertilidad física y química.

Debido a la aplicación de productos fitosanitarios las concentraciones de Cu constituyen el principal factor limitante de la producción, dado que han superado o están próximas al límite de toxicidad. Sin embargo, las concentraciones de Zn corresponden a niveles de disponibilidad media o altas y están muy lejos de niveles excesivos.

BIBLIOGRAFÍA

- Abreu, C.A.D., van Raij, B., Gabe, V., Abreu, M.F.D., Paz-González, A. 2002. Efficiency of multinutrient extractants for the determining of available Zn in soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 33 (15-18), 3313–3324. <https://doi.org/10.1081/CSS-120014525>
- Abreu, C.A.D., van Raij, B., Abreu, M.F.D., Paz González, A. 2005. Routine soil testing to monitor heavy metals and Boron. *Scientia Agricola* 62 (6), 564–571. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162005000600009>
- Arias, M., López, E., Fernández, D., Soto, B. 2004. Copper distribution and dynamics in acid vineyard soils treated with copper-based fungicides. *Soil Science* 169, 796–805. <https://doi.org/10.1097/01.ss.0000148739.82992.59>
- Calvo, R., Macias, F. 1992. *Aptitud agronómica de los suelos de la Provincia de La Coruña. (Cultivos, Pinos, Robles, Eucaliptos y Castaños)*. Editorial Diputación Provincial de A Coruña: A Coruña. 88 pp.
- Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Novak, J.M., Parkin. T.B., Karlen, D.L., Turco, R.F., Konopka, A.E. 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal* 58 (5), 1501-1511. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>
- Caridad Cancela, R., Vidal Vázquez, E., Vieira, S.R., Abreu, C.A., Paz González, A. 2005. Assessing the spatial uncertainty of mapping trace elements in cultivated fields. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 36 (1-3), 253–274. <https://doi.org/10.1081/CSS-200043078>

- Cesco, S., Pii, Y., Borruso, L., Orzes, G., Lugli, P., Mazzetto, F., Genova, G., Signorini, M., Brunetto, G., Terzano, R., Vigani, G., Mimmo, T. 2021. A Smart and Sustainable Future for Viticulture Is Rooted in Soil: How to Face Cu Toxicity. *Applied Science* 11 (3), 907. <https://doi.org/10.3390/app11030907>
- Dafonte Dafonte, J., Guitián Ulloa, M., Paz-Ferreiro, J., Siqueira Machado, G., Vidal Vázquez, E. 2010. Mapping of soil micronutrients in an European Atlantic agricultural landscape using ordinary kriging and indicator approach. *Bragantia* 69, 175–186. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052010000500018>
- Fernández-Calviño, D., López-Periago, E., Nóvoa-Muñoz, J.C., Arias-Estévez, M. 2008. Short scale distribution of copper fractions in a vineyard acid soil. *Land Degradation and Development* 19, 190–197. <https://doi.org/10.1002/ldr.833>
- Fernandez-Calviño, D., Novoa-Munoz, J.C., Diaz-Ravina, M., Arias-Estevéz, M. 2009. Cooper accumulation and fractionation in vineyard soils, from temperate humid zone (NW Iberian Peninsula). *Geoderma* 153 (1-2), 119–129. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.07.024>
- Fernández-Calviño, D., Garrido-Rodríguez, B., López-Periago, J. E., Paradelo, M., Arias-Estévez, M. 2013. Spatial distribution of copper fractions in a vineyard soil. *Land Degradation and Development*, 24 (6), 556–563. <https://doi.org/10.1002/ldr.1150>
- Fernández Marcos, M. L. 2011, Metales pesados en el suelo. López-Mosquera, M. E., Sáinz Osés, M. J., (eds.), *Gestión de residuos orgánicos de uso agrícola*. 33–48. Universidade de Santiago de Compostela. ISBN 978-84-9887-822-6.
- García-Tomillo, A., Mirás-Avalos, J.M., Dafonte-Dafonte, J., Paz González, A. 2017. Estimating soil organic matter using interpolation methods with an electromagnetic induction sensor and topographic parameters: a case study in a humid region. *Precision Agriculture* 18 (5), 882–897. <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9481-6>
- García-Tomillo, A., da Silva Dias, R., Vidal Vázquez, E., Varela Vila, I., Valcárcel Armesto, M., Dafonte-Dafonte, J., Paz-González, A. 2020. Multifractal and joint multifractal description of available nutrients concentrations extracted by two methods along short transects. *Archives of Agronomy and Soil Science* 66 (2), 236–249. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1608954>
- Guitián, F., Carballas, T. 1976. *Técnicas de análisis de suelos*. 2ª edición. Ed. Pico Sacro. Santiago de Compostela. 288 pp.
- Ingaramo, O.E., Paz-Ferreiro, J., Mirás Avalos, J.M., Vidal Vázquez, E. 2007. Caracterización de las propiedades generales del suelo en una parcela experimental con distintos sistemas de laboreo. *Cadernos do Laboratorio Xeoloxico de Laxe* 32, 127–137.
- IUSS-WRB Working Group. 2022. *World Reference Base for Soil Resources*. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 236 pp.
- Kabata-Pendias, A., Pendias, H. 2001. *Trace Elements in Soils and Plants*. 3rd Edition, CRC Press, Boca Raton. 403 pp.
- Lindsay, W.L., Norvell, W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of America Journal* 42, 421–428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
- Macías Vázquez, F., Calvo de Anta, R. (2009). *Niveles genéricos de referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos de Galicia*. Xunta de Galicia. Santiago de Compostela. 232 pp.

- McBratney, A. B., Webster, R. 1981, Spatial dependence and classification of the soil along a transect in northeast Scotland. *Geoderma* 26 (1-2), 63–82. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(81\)90076-8](https://doi.org/10.1016/0016-7061(81)90076-8)
- Mehlich, A. 1984. Mehlich-3 soil test extractant: A modification of Mehlich-2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 15, 1409–1416. <https://doi.org/10.1080/00103628409367568>
- Paz-Ferreiro, J., Pereira de Almedia, V., Alves, M.C., de Abreu, C.A., Vieira, S.R., Vidal Vázquez, E. 2016. Spatial variability of soil organic matter and cation exchange capacity in an Oxisol under different land uses. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 47, 75–89. <https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1232099>
- Paz González, A., Taboada Castro, M^a. T. and Gómez Suárez, M^a. J. 1996. Spatial variability on topsoil micronutrient content on a one-hectare scale. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 27 (3-4), 479–503. <https://doi.org/10.1080/00103629609369570>
- Paz-González, A., Vieira, S.R., Taboada Castro, M.T. 2000. The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon. *Geoderma* 97, 273–292. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(00\)00066-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00066-5)
- Raij, B. Van, Andrade, J.C., Cantarella, H., Quaggio, J.A. 2001. *Análise química para avaliação da fertilidade de solo tropicais*. Campinas: Instituto Agronômico, Campinas, Brasil. 285 pp.
- Sanchez, P.A., Palm, C.A., Buol, S.W. 2003. Fertility capability soil classification: A tool to help assess soil quality in the tropics. *Geoderma* 114, 157–185. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00040-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00040-5)
- Silva, E. F. F., García-Tomillo, A., Da Silva e Souza, D., Vidal Vázquez, E., Machado Siqueira, E., Da Costa Dantas, D., Paz González, A. 2021. Multifractal and joint multifractal analysis of soil micronutrients extracted by two methods along a transect in a coarse textured soil. *European Journal of Soil Science* 73 (2), 608–622. <https://doi.org/10.1111/ejss.13052>
- Soil Survey Staff. 2022. *Keys to Soil Taxonomy*, 13th edition. USDA Natural Resources Conservation Service. 410 pp.
- Trangmar, B.B., Yost, R.S., Wehara, G. 1985. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy* 28, 45-94. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60673-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60673-2)
- Ulloa Guitián, M., Abreu, C. A., Paz-González, A. 2001. Disponibilidade de macro- y micronutrientes en un suelo de cultivo de Mabegondo (A Coruña). *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe* 26, 243–254.
- Varela Vila, I. 2022. *Impacto del cultivo de la vid en la variabilidad espacial de las propiedades químicas de un suelo de la Denominación de Origen Ribeiro*. Tesis Doctoral. Universidade da Coruña. 145 pp.
- Varela Vila, I., Cardenas-Aguiar, E. M., Lado Liñares, M., Paz González, A., Vidal Vázquez, E. 2023. Análisis geoestadístico de macroelementos, microelementos y metales pesados extraídos con Mehlich-3 en una microparcela de viñedo. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe* 45, 59–74. <https://doi.org/10.17979/cadlaxe.2023.45.0.10120>
- Vázquez-Blanco, R., González-Feijoo, R., Campillo-Cora, C., Fernández-Calviño, D., Arenas-Lago, D. 2023. Risk Assessment and Limiting Soil Factors for Vine Production—Cu and Zn Contents in Vineyard Soils in Galicia (Rías Baixas D.O.). *Agronomy* 13, 309. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020309>

- Vidal-Vazquez, E., Caridad-Cancela, R., Taboada-Castro, M.M., Paz-Gonzalez, A., de Abreu, C.A. 2005. Trace elements extracted by DTPA and Mehlich-3 from agricultural soils with and without compost additions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 46 (4-6), 717–727. <https://doi.org/10.1081/CSS-200043354>