

Análisis De Incertidumbre En El Dimensionamiento De Pilotes Basado En Métodos Empíricos Del SPT

Jose Manuel Guerra Colque

Profesor, Universidad Privada de Santa Cruz de la Sierra, Santa Cruz, Bolivia, jmguerra@upsa.edu.bo

Ariana Méndez Ribera

Estudiante de graduación, Universidad Privada de Santa Cruz de la Sierra, Santa Cruz, Bolivia,

a2024113052@estudiantes.upsa.edu.bo

André Luis Meier

Doctorando, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Brasil,

de.luis.meier@gmail.com

Henrique Francisco Milan Junior

Maestrante, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Brasil,

henriquefmilan@gmail.com

Gracieli Dienstmann

Profesor, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Brasil, g.dienstmann@ufsc.br

RESUMEN: Este trabajo analiza la incertidumbre en el diseño de fundaciones con estacas perforadas, utilizando métodos empíricos basados en el SPT en depósitos marinos arenosos de Florianópolis, Brasil. Se utilizó una base de datos con 40 ensayos SPT realizados en dos sitios representativos de la misma unidad litológica, lo que permitió investigar la heterogeneidad vertical del suelo mediante la normalización y el análisis estadístico de los valores N_{SPT} por profundidad. Se aplicaron algoritmos de segmentación para identificar tendencias y residuos, y se caracterizó la dependencia vertical mediante la función de autocorrelación empírica promedio. Se generaron simulaciones de perfiles SPT por el método espectral, aplicando análisis de confiabilidad tanto con simulaciones Monte Carlo como con el Método de Confiabilidad de Primera Orden (FORM, por sus siglas en inglés), en combinación con los métodos de Décourt & Quaresma y Aoki & Velloso. Se evalúa el impacto de la variabilidad geotécnica y de la autocorrelación vertical en los factores de reducción necesarios para alcanzar índices de confiabilidad $\beta=2,0$ y $2,33$.

PALABRAS-CLAVE: SPT, Monte Carlo, autocorrelación vertical, FORM, estacas perforadas, métodos empíricos.

RESUMO: Este trabalho analisa a incerteza no dimensionamento de fundações com estacas escavadas, utilizando métodos empíricos baseados no SPT em depósitos marinhos arenosos de Florianópolis, Brasil. Foi utilizada uma base de dados com 40 ensaios SPT realizados em dois sítios representativos da mesma unidade litológica, permitindo investigar a heterogeneidade vertical do solo por meio da normalização e análise estatística dos valores de N_{SPT} por profundidade. Foram aplicados algoritmos de segmentação para identificar tendências e resíduos, enquanto a dependência vertical foi caracterizada por meio da função de autocorrelação empírica média. Perfis SPT simulados foram gerados pelo método espectral, sendo utilizadas simulações de Monte Carlo e o Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM – First Order Reliability Method), em combinação com os métodos de Décourt & Quaresma e Aoki & Velloso. Avalia-se o impacto da variabilidade geotécnica e da autocorrelação vertical nos fatores de redução necessários para atingir índices de confiabilidade $\beta=2,0$ e $2,33$.

PALAVRAS-CHAVE: SPT, Monte Carlo, autocorrelação vertical, FORM, estacas escavadas, métodos empíricos.

1 INTRODUCCIÓN

La geotecnia en regiones costeras del sur de Brasil enfrenta desafíos particulares debido a la heterogeneidad de los depósitos marinos arenosos, presentes de manera significativa en el área de

Florianópolis. Para este trabajo, se emplearon datos provenientes de Milan et al. (2025), quienes realizaron una caracterización detallada de la variabilidad espacial vertical de estos depósitos mediante una campaña de 40 ensayos SPT en dos sitios representativos de la región. Esta base de datos ofrece un marco robusto para investigar cómo la variabilidad natural del subsuelo puede afectar el diseño de fundaciones profundas.

Tradicionalmente, el dimensionamiento de estacas perforadas en estos contextos se basa en métodos empíricos ampliamente difundidos, tales como los propuestos por Aoki & Velloso (1975) y Décourt & Quaresma (1978), que utilizan valores promedio del SPT y resultan en cálculos deterministas. Sin embargo, diversos estudios han evidenciado que la incertidumbre inherente a los parámetros geotécnicos, como el propio SPT, puede repercutir significativamente en los factores de seguridad y la confiabilidad estructural del diseño (Phoon et al., 2022; Nogueira, Boni & Giacheti, 2022).

Con el objetivo de analizar este impacto, en este trabajo se aplicaron análisis estadísticos avanzados, segmentación de tendencias y simulaciones probabilísticas sobre los perfiles SPT obtenidos, evaluando tanto la dispersión local como la autocorrelación vertical de los datos. Se emplearon el Método de Confiabilidad de Primera Orden (FORM; Hasofer & Lind, 1974) y simulaciones Monte Carlo para comparar el comportamiento de los factores de seguridad y la probabilidad de falla frente a los enfoques convencionales. Así, se busca aportar una visión más realista y adaptada a la geotecnia del sur respecto a la confiabilidad en el diseño de fundaciones con estacas perforadas.

2 METODOLOGÍA

2.1 Descripción del sitio y datos utilizados

La caracterización de la variabilidad geotécnica para este estudio se basa en datos provenientes de dos sitios ubicados en la ciudad de Florianópolis, SC, Brasil, como se muestra en la figura 1 que han sido objeto de campañas intensivas de ensayos SPT según lo reportado por Milan et al. (2025). Ambos sitios, situados a una distancia aproximada de 5 km, pertenecen a una misma unidad litológica, clasificada como depósito sedimentario marino de playa del Pleistoceno, característico de la región costera del sur de Brasil. Los sedimentos presentan textura arenosa y reflejan procesos de deposición relacionados a ambientes marinos.

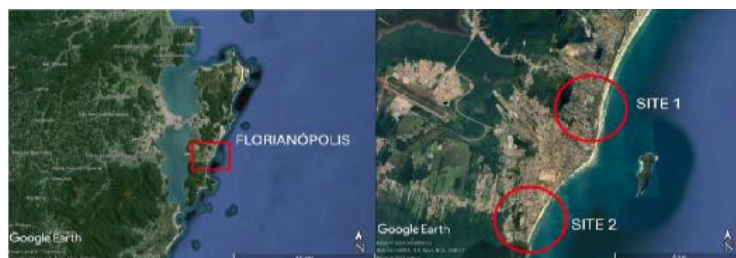


Figura 1. Ubicación de sitio 1 y 2 (tomado de Milan et al. ,2025).

El conjunto de datos empleado incluye un total de 40 perfiles SPT, distribuidos equitativamente entre los dos sitios. Para los análisis estadísticos, se consideraron las primeras 15 mediciones de cada sondeo en el sitio 1 y 17 en el sitio 2, correspondiendo a profundidades de hasta 15 y 17 metros, respectivamente. La elección de estos intervalos responde a la homogeneidad de la información disponible y la relevancia de los estratos para el diseño de fundaciones profundas. Se presentan los perfiles en la figura 2.

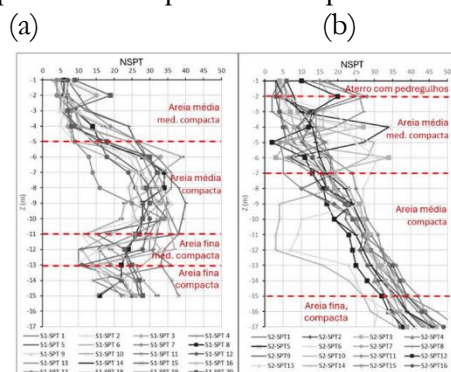


Figura 2. Perfiles de SPT (a) sitio 1 y (b) sitio 2 (tomado de Milan et al. ,2023).

2.2 Análisis probabilístico y caracterización de perfiles aleatorios

El análisis probabilístico es fundamental en la geotecnia moderna para cuantificar el impacto de la variabilidad y la incertidumbre de los parámetros del suelo sobre la confiabilidad estructural (Phoon et al., 2022). En este estudio, los valores de NSPT se modelan como variables aleatorias espacialmente correlacionadas en la dirección vertical, capturando así la dependencia entre capas y la heterogeneidad inherente a los depósitos marinos arenosos (Milan et al., 2025).

La caracterización del campo aleatorio siguió el enfoque clásico de descomposición en componentes de tendencia y fluctuación (Campello et al., 2022). Cada valor de NSPT a una determinada profundidad se representa como la suma de una tendencia suavizada $t(z)$ y una fluctuación local $w(z)$ como se muestra en la ecuación 1:

$$\xi(z) = t(z) + w(z) \quad (1)$$

donde $t(z)$ representa la evolución suave de las propiedades del suelo y $w(z)$ la variabilidad estadística inherente (Uzelli et al., 2017; Campello et al., 2022). Los parámetros estadísticos principales (media μ y desviación estándar σ) y la función de autocorrelación vertical, una covarianza promedio entre datos equidistantes a diferentes distancias τ , se estimaron empíricamente a partir de los datos y se ajustaron mediante modelos teóricos, como el exponencial, el gaussiano y los que se muestran en la tabla 1, seleccionando el mejor ajuste con base en el coeficiente de determinación R^2 .

Tabla 1. Modelos teóricos de funciones de autocorrelación.

Modelo	Función de autocorrelación
Exponencial	$\rho(\tau) = \exp\left(-\frac{2 \tau }{\delta}\right)$
Exponencial cuadrático	$\rho(\tau) = \exp\left(-\pi\left(\frac{\tau}{\delta}\right)^2\right)$
Coseno exponencial	$\rho(\tau) = \cos\left(\frac{\tau}{\delta}\right) \exp\left(-\frac{ \tau }{\delta}\right)$
Markov de segundo orden	$\rho(\tau) = \left(1 + \frac{4 \tau }{\delta}\right) \exp\left(-\frac{4 \tau }{\delta}\right)$

2.3 Simulación de campos aleatorios: método espectral

A partir de esta caracterización se generaron realizaciones de perfiles SPT simulados empleando el método espectral (Fenton & Vanmarcke, 1995), preservando la covarianza y la dependencia vertical observada. La ecuación 2 describe el campo aleatorio como una suma de la tendencia μ , el aporte de la densidad espectral asociada a la función de autocorrelación $S(\kappa_k)$, el intervalo entre números de onda Δk , fase aleatoria uniformemente distribuida en $[0, 2\pi]$ ϕ_k , para el total de términos armónicos que definen la sumatoria.

$$X(z) = \mu + \sum \sqrt{2S(\kappa_k)\Delta k} \cdot \cos(\kappa_k z + \phi_k) \quad (2)$$

Con la simulación de perfiles aleatorios, se caracterizan los resultados obtenidos para determinar cuántos están en los índices de confianza recomendados por la LRFD, $\beta = 2.00$ y $\beta = 2.33$.

2.4 Cálculo de capacidad portante con métodos semiempíricos

En el presente estudio se emplearon los métodos semiempíricos propuestos por Aoki y Velloso (1975) y por Décourt y Quaresma (1978), ampliamente reconocidos en la práctica geotécnica para la estimación de la capacidad de carga axial de pilotes. Ambos métodos se fundamentan en el uso de valores directos de N_{spt}



obtenidos en la punta y en el fuste, complementados con factores de carga tabulados que dependen del tipo de suelo y de las características de la cimentación. Las ecuaciones y los coeficientes aplicados en este análisis fueron tomados de Cintra y Aoki (2011)

2.5 Análisis de confiabilidad: FORM y simulación Monte Carlo

El método FORM (*First-Order Reliability Method*) se basa en el concepto de aproximar la frontera de fallo de un sistema no lineal mediante una aproximación lineal, obteniendo la estimación de la confiabilidad a través de un punto de diseño (punto más cercano al límite de fallo) en el espacio de las variables aleatorias. Generalmente, en problemas de geotecnia, la función $g(X)$ se expresa como una ecuación que depende de los parámetros geotécnicos, como la resistencia del suelo, la capacidad portante de los pilotes, o la carga aplicada. Para un sistema estructural o geotécnico, la forma general de la función de rendimiento es como se muestra en la ecuación 5 (Manoj, 2016):

$$g(x) = R(x) - S(x) \quad (5)$$

Este punto de diseño se encuentra utilizando una aproximación de primer orden en el espacio de variables estándar. El cálculo del índice de confiabilidad, β , se obtiene mediante la fórmula del gradiente. Es importante notar que en el modo práctico cuando se trabajan con varias variables aleatorias, es necesario conocer la correlación de estas, para este propósito en los códigos empleados se formula una matriz que Cholesky, una factorización de la matriz de covarianza que permite multiplicar los datos aleatorios y que mantengan la covarianza de los datos experimentales (ecuación 6; Manoj, 2016):

$$\beta = \frac{g(x)}{||\nabla g(x)||} \quad (6)$$

La iteración del método FORM busca minimizar la distancia entre el punto de diseño y el límite de fallo, a través de un proceso iterativo que actualiza el punto de diseño en cada paso, utilizando la siguiente fórmula de actualización del punto de diseño (ecuación 7; Manoj, 2016):

$$x_{k+1} = x_k - \lambda_k \cdot \nabla g(x_k) \quad (7)$$

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis de autocorrelación y tendencias

Con base en la Figura 3a, se observa que para el sitio 1 la tendencia de los valores de N_{spt} fue ajustada mediante una función de tipo parabólico, la cual proporcionó el mejor modelo de adecuación a los datos observados. Este ajuste permitió obtener residuos con oscilaciones próximas a cero, como se muestra en la Figura 3b, lo que evidencia una adecuada representación de la tendencia principal del perfil.

De manera análoga, para el sitio 2 (Figura 3c), también se empleó una función parabólica para modelar la tendencia de los valores de N_{spt} , alcanzando igualmente un buen ajuste a los datos experimentales. Los residuos obtenidos para este sitio (Figura 3d) presentan una dispersión aleatoria alrededor de cero, lo que indica que el modelo de tendencia seleccionado describe apropiadamente el comportamiento general del perfil.

El registro de los parámetros estadísticos de los residuos, como la media y la desviación estándar a cada profundidad, es fundamental para caracterizar la variabilidad vertical de los perfiles SPT. Esta información, complementaria al análisis de la autocorrelación y la escala de fluctuación, permite describir el comportamiento del perfil mediante dos componentes: la dispersión local (por profundidad) y la correlación entre capas adyacentes. De este modo, se logra una representación más realista de la heterogeneidad vertical del subsuelo, lo que es crucial para la simulación de campos aleatorios y la evaluación probabilística en ingeniería geotécnica.

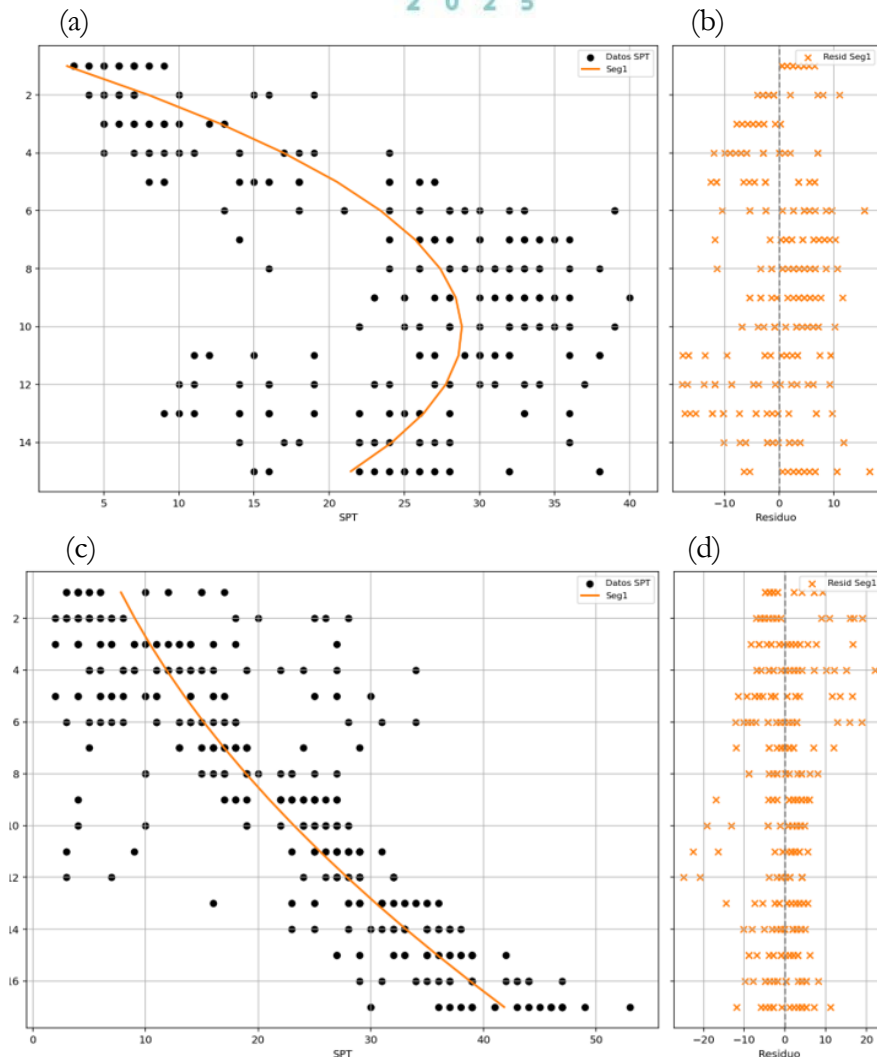


Figura 3. Perfis de SPT (a) tendência sitio 1; (b) resíduos sitio 1 (c) tendência sitio 2, y (d) resíduos sitio 2

La Figura 4 muestra la función de autocorrelación empírica de los residuos y los modelos teóricos ajustados para cada sitio. La interpretación de estos modelos permitió estimar escalas de fluctuación (o distancias de autocorrelación) de 1,70 m para el sitio 1 y de 2,73 m para el sitio 2. Estos valores cuantifican la extensión vertical sobre la cual las propiedades del subsuelo, evaluadas mediante el ensayo SPT, mantienen una correlación significativa. La escala de fluctuación, en conjunto con la dispersión local de los residuos a cada profundidad, define la estructura de dependencia vertical del perfil y proporciona información clave para la simulación de campos aleatorios y el análisis probabilístico de la variabilidad geotécnica en ambos sitios.

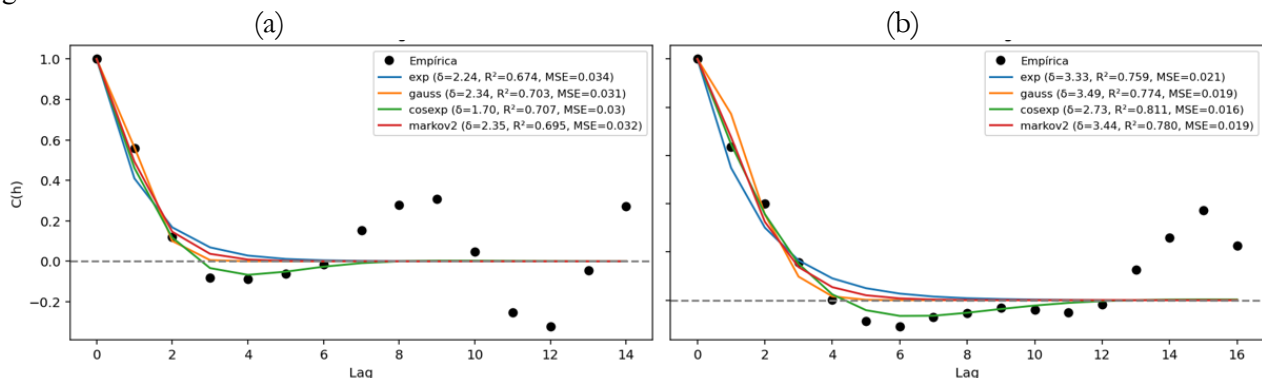


Figura 4. Autocorrelación empírica y ajustes a modelos de autocorrelación para (a) sitio 1 y (b) sitio 2

3.2 Generación de datos aleatorios

La Figura 5 presenta un conjunto de simulaciones generadas mediante el método espectral (FFT) para el perfil SPT del sitio 2. Este procedimiento consiste en la síntesis de campos aleatorios unidimensionales, utilizando la función de autocorrelación ajustada empíricamente para preservar la dependencia espacial vertical observada en los datos originales. El proceso de simulación integra tres componentes: la tendencia global del perfil, la media local de los residuos en cada profundidad y la estructura de correlación definida por el modelo de autocorrelación. No obstante, una limitación inherente al método FFT es que no permite imponer una variabilidad local de la desviación estándar a lo largo del perfil, solo localmente basada en los segmentos definidos y ajustados; por este motivo, se utiliza un valor promedio de sigma, lo que implica que la dispersión en las simulaciones refleja un valor global representativo. En la figura se muestran 30 trayectorias simuladas junto con la tendencia, lo que permite visualizar tanto la heterogeneidad introducida por el proceso aleatorio como la adecuada preservación de la correlación vertical del perfil SPT. Para los análisis de confiabilidad, este procedimiento fue repetido para generar 1000 realizaciones independientes.

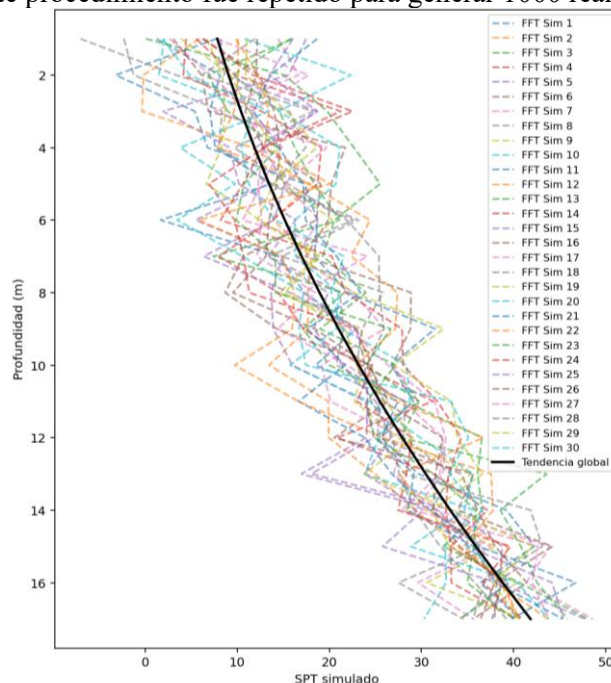


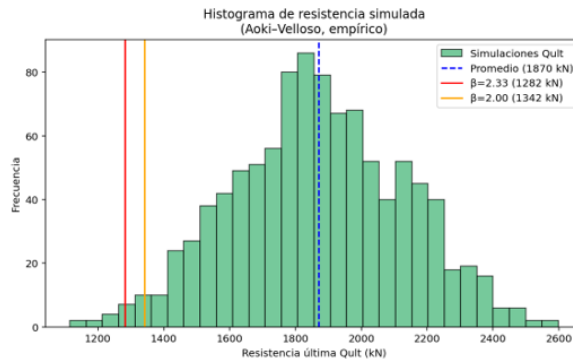
Figura 5. Ejemplo de simulaciones método espectral sitio 2

3.3 Resultados de capacidad portante y confiabilidad

En las Figuras 6 y 7 se presentan los histogramas de la capacidad última de carga obtenida a partir de simulaciones numéricas para los sitios 1 y 2, aplicando los métodos de Aoki-Velloso y Décourt-Quaresma, respectivamente. En ambos casos, las simulaciones se basan en la generación de múltiples realizaciones de perfiles SPT sintéticos mediante el método espectral (FFT), el cual permite reproducir fielmente la estructura de autocorrelación y la variabilidad espacial identificadas en los datos experimentales de cada sitio. Este procedimiento garantiza que las realizaciones capturen tanto la tendencia global del perfil como la dispersión local asociada a la heterogeneidad del subsuelo.

La integración del método FFT en el proceso de simulación posibilita la evaluación probabilística de la resistencia última, permitiendo analizar la influencia de la incertidumbre geotécnica sobre la capacidad portante calculada con ambos métodos. Los histogramas obtenidos reflejan la distribución de resultados para cada sitio y método, proporcionando información cuantitativa sobre la dispersión, valores medios y cuantiles relevantes para el diseño. Esta aproximación es fundamental para comparar el comportamiento estadístico de la capacidad portante entre los dos sitios y entre las metodologías empleadas, constituyendo una base sólida para el análisis de confiabilidad en el dimensionamiento de fundaciones profundas.

(a)



(b)

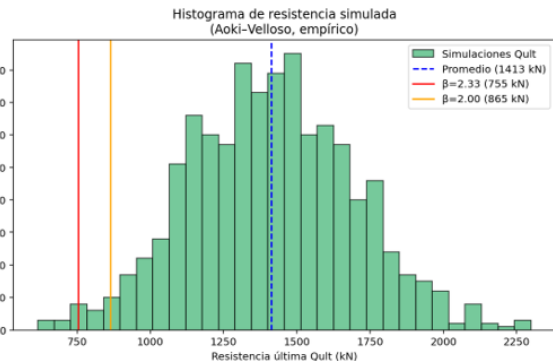
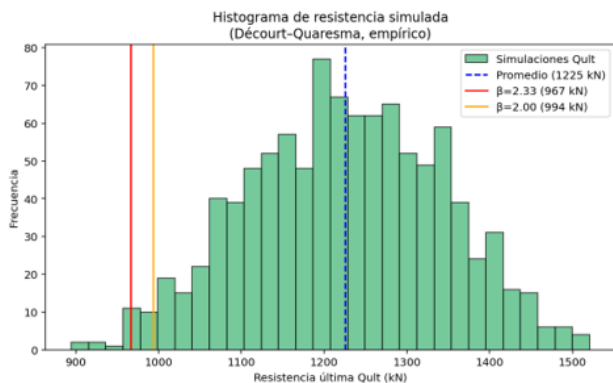


Figura 6. Histogramas simulaciones Método Aoki-Velloso sitio 1 y 2

(a)



(b)

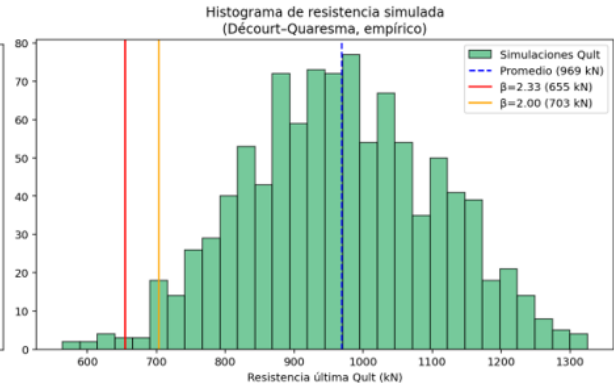
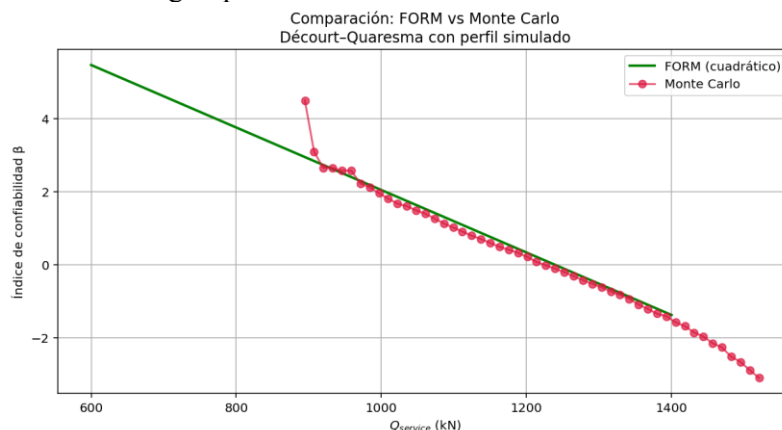


Figura 7. Histogramas simulaciones Método Décourt-Quaresma (a) sitio 1 y (b) sitio 2

Para la Figura 8 se generaron múltiples simulaciones del perfil SPT utilizando campos aleatorios mediante el método espectral (FFT), considerando la desviación estándar promedio estimada a partir de los residuos locales. A partir de estas simulaciones, se calcularon los valores de capacidad última mediante el método de Décourt-Quaresma y se construyó la curva de confiabilidad β en función de la carga de servicio utilizando el enfoque de Monte Carlo. Estos resultados se compararon directamente con la curva obtenida mediante el método FORM aplicado sobre los mismos parámetros estadísticos, permitiendo analizar la consistencia entre ambas metodologías para el sitio 1.

Figura 8. Comparación del índice de confiabilidad β calculado mediante los métodos FORM y Monte Carlo para el método de Décourt-Quaresma en el sitio 1.



La Tabla 5 sintetiza los resultados obtenidos a partir del análisis probabilista de la capacidad última de pilotes para ambos sitios y metodologías consideradas. Se presentan los valores determinísticos (media) calculados a partir de los perfiles promedio de SPT, así como las resistencias características correspondientes a índices de confiabilidad $\beta=2.00$ y $\beta=2.33$, determinadas tanto por simulación Monte Carlo (MC) como mediante el método de primer orden (FORM). La comparación entre ambos enfoques y métodos resalta la consistencia general entre los resultados y permite cuantificar el impacto de la incertidumbre y la variabilidad espacial del subsuelo en los valores de resistencia última adoptados para el diseño geotécnico. Además, se observa que los valores calculados por FORM tienden a ser ligeramente más conservadores respecto a los obtenidos por Monte Carlo, lo que es coherente con el carácter aproximado y de primer orden del método.

Tabla 5. Resultados

Sitio	Método	Determinístico (media)	$\beta=2.00$ [KN]	$\beta=2.33$ [KN]
S1	Aoki-Velloso (MC)	1879	1342	1282
	Aoki-Velloso (FORM)		1400	1314
	Décourt-Quaresma (MC)	1228	994	967
	Décourt-Quaresma (FORM)		1008	959
S2	Aoki-Velloso (MC)	1384	865	755
	Aoki-Velloso (FORM)		914	829
	Décourt-Quaresma (MC)	866	703	655
	Décourt-Quaresma (FORM)		747	714

4 CONCLUSIONES

El presente estudio evaluó la capacidad última de pilotes a través de análisis probabilistas que integraron simulaciones numéricas (FFT), el método de primer orden (FORM) y Monte Carlo, aplicados a los métodos empíricos de Aoki-Velloso y Décourt-Quaresma en dos sitios distintos. Para la síntesis de perfiles SPT simulados mediante FFT, se utilizó la desviación estándar promedio estimada a partir de los residuos, mientras que en el análisis FORM se incorporó la variabilidad local de la desviación estándar a cada profundidad, permitiendo analizar explícitamente el impacto de las fluctuaciones locales en el perfil. A pesar de estas diferencias metodológicas en el tratamiento de la dispersión, los resultados muestran una notable convergencia en las curvas de confiabilidad y en los valores de resistencia característica, evidenciando la robustez de ambos enfoques estadísticos. Los factores de reducción calculados para los índices de confiabilidad $\beta=2.00$ y $\beta=2.33$ se ubicaron en rangos coherentes con la práctica geotécnica internacional (entre 0,54 y 0,72), lo que valida el empleo de simulaciones FFT con sigma promedio y el análisis FORM con sigma local como herramientas fiables para el dimensionamiento de fundaciones profundas bajo incertidumbre. Estos hallazgos subrayan la importancia de considerar tanto la variabilidad global como la local en la caracterización probabilista de parámetros geotécnicos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado con el apoyo de la CAPES (Código de financiamiento 001), en el ámbito del programa MOVE LA AMERICA. A su vez este trabajo es la continuación de un proyecto financiado por el programa UPSA – Academia Nacional de Ciencias de Bolivia Departamental Santa Cruz (ANCB-SC).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS



- Aoki, N., Velloso, D. A. (1975) *An approximate method to estimate the bearing capacity of piles*. Proceedings of the Fifth Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Buenos Aires, v. 1, p. 367–376.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). *NBR 6122: Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2023). *NBR 6484: Solo — Sondagens de simples reconhecimento com SPT — Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Campello, B. D. C., Fernandes, M. M., Araújo, J. B., Silva, V. S., & Schnaid, F. (2022) *Random field simulation for the reliability analysis of pile foundations in spatially variable soils*. Computers and Geotechnics, 144, 104646.
- Cintra, J. C., Aoki, N. (2011) *Fundações por estacas: projeto geotécnico*. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos.
- Décourt, L., Quaresma, A. R. (1978) *Capacidade de carga de estacas a partir de SPT*. Proceedings of the 3rd Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Rio de Janeiro, ABMS, v. 2, p. 45–53.
- Fenton, G. A., Griffiths, D. V. (2008) *Risk Assessment in Geotechnical Engineering*. John Wiley & Sons, Inc.
- Fenton, G. A., Vanmarcke, E. H. (1995) *Simulation of random fields via spectral representation*. Journal of Engineering Mechanics, 121(1), p. 114–131.
- Hasofer, A. M., Lind, N. C. (1974) *Exact and invariant second-moment code format*. Journal of the Engineering Mechanics Division, 100(1), p. 111–121.
- Milan, H.; Dienstmann, G.; Zampieri, L. Q.; Scheidt, A. M. (2025). Análise da variabilidade espacial vertical inerente de um depósito sedimentar marinho por meio de ensaios SPT. In: XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG 2024, Florianópolis. Anais... v. 12. DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/489.
- Nogueira, C. M. S., Boni, A. T., Giacheti, H. L. (2022) *Probabilistic analysis of pile foundations: a practical example using Brazilian standards and random field simulation*. Soils and Rocks, 45(4), e20220408.
- Phoon, K. K., Kulhawy, F. H., Tang, W. H., Honjo, Y. (2022) *Reliability-based design in geotechnical engineering: developments and applications*. Georisk, 16(2), p. 89–107.
- Uzielli, M., Vannucchi, G., Phoon, K. K. (2017) *Random field characterization of geotechnical properties*. In: Griffiths, D. V., Fenton, G. A. (eds.), *Risk and reliability in geotechnical engineering*, CRC Press, p. 119–142.
- Whitman, R. V. (2000) *Organizing and evaluating uncertainty in geotechnical engineering*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126(7), p. 583–593.
- Zhang, J., Xiao, T., Ji, J., Zeng, P., & Cao, Z. (2023) *Geotechnical Reliability Analysis: Theories, Methods and Algorithms*. Springer.