



Modelado gravimétrico de la infiltración de agua utilizando la ecuación de Richards

J. Pendiuk^{1,2} y L. Guarracino^{1,2,3}

¹ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP. jonatanpendiuk@gmail.com

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Argentina.

³ Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP.

Resumen

La precisión de los gravímetros superconductores es tal que permite detectar el efecto gravimétrico generado por la infiltración de agua durante una precipitación. El gravímetro superconductor R038 del Observatorio Argentino Alemán de Geodesia (AGGO) tiene una precisión de 0.1 nm/s^2 ($10 \text{ } \mu\text{Gal}$) mientras que el efecto gravimétrico de una lámina de agua de 1 mm de espesor se estima en 0.4 nm/s^2 . Estos valores evidencian claramente la potencialidad de estos gravímetros para analizar procesos hidrológicos que ocurren a escala local tales como la infiltración y la evapotranspiración que representan ganancias y pérdidas de masa, respectivamente. En este trabajo se presenta un modelado numérico para estimar las variaciones de gravedad generadas por el proceso de infiltración a partir de la simulación de flujo de agua en la zona no saturada. Con este fin se asume que el flujo es vertical y que existe un radio de influencia finito para el efecto gravitatorio de la infiltración. Bajo estas hipótesis se resuelve la ecuación de Richards 1D mediante un método de elementos finitos mixtos y se calcula el efecto gravimétrico utilizando la expresión analítica de un cilindro vertical centrado en el gravímetro. El modelo desarrollado es utilizado para analizar los efectos del radio de influencia, de las propiedades hidráulicas del suelo y de la intensidad de la precipitación. Para este estudio se utilizan datos meteorológicos de la estación de AGGO y valores de los parámetros hidráulicos calculados a partir del análisis granulométrico de las muestras de suelo. Las simulaciones numéricas muestran que el efecto de la precipitación es relativamente local ya que el agua que infiltra en un radio de 100 m representa aproximadamente el 95% del efecto gravimétrico total. En relación a las texturas de suelo se observa que el efecto es significativo sólo para radios de influencia pequeños. Finalmente, y como era de esperar, la intensidad de la precipitación afecta en forma directa el valor de la gravedad. Estos resultados constituyen una base teórica y metodológica para futuras aplicaciones prácticas en el predio de AGGO.

Palabras clave: ecuación de Richards, zona no saturada, gravímetro superconductor, simulaciones numéricas.

Introducción

El gravímetro superconductor R038 (GS) de AGGO realiza mediciones relativas de gravedad de forma continua con una precisión de 0.1 nm/s^2 ($10 \text{ } \mu\text{Gal}$). Esta precisión



resulta sensible a las redistribuciones de masa de agua a escala local motivando su implementación como un sensor hidrológico para la estimación de parámetros hidráulicos del subsuelo. Por otra parte, desde un punto de vista gravimétrico la componente hidrológica en la señal del gravímetro es considerada como ruido y por lo tanto debe ser removida de los registros. Existen varios antecedentes del estudio de los efectos hidrológicos sobre la señal de los GSs en observatorios geodésicos similares al AGGO (Creutzfeld et al., 2008; Longuevergne et al., 2009; Naujoks et al., 2008).

En este trabajo se analiza el efecto de la precipitación sobre la gravedad, que es un fenómeno local, transitorio y relativamente rápido. El agua infiltrada puede producir un aumento en la señal del gravímetro con forma de “escalón” de unos pocos nm/s^2 . A modo de ejemplo, el efecto gravimétrico de una lámina de agua de 1 mm de espesor se estima en 0.4 nm/s^2 . En particular, el efecto gravimétrico producido por tormentas fuertes debe ser correctamente modelado y removido de la señal del gravímetro ya que deteriora el espectro de frecuencia y el posterior análisis de los fenómenos de marea (Meurers, 2006).

Materiales y métodos

El modelo numérico implementado se basa en la resolución de la ecuación de Richards 1D utilizando un método de elementos finitos mixtos combinado con un método iterativo de Picard modificado para tratar los términos no lineales (Celia et al., 1990). La ecuación de Richards para flujo vertical tiene la siguiente expresión:

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{dh}{dz} + K(h) \right), \quad (1)$$

donde h es la altura de presión; K es la conductividad hidráulica del medio; y θ es el contenido volumétrico de agua.

La ecuación (1) se resuelve con condiciones de borde tipo Neumann. En el borde superior se impone la infiltración de agua producida por la lluvia, mientras que en el borde inferior se especifica el flujo regional. Como condición inicial se asume un estado estacionario que se determina a partir de la posición del nivel freático. Para describir las propiedades hidráulicas se utiliza el modelo de van Genuchten (1980). Los parámetros del modelo utilizados para las texturas de interés se obtuvieron del trabajo de Carsell y Parrish (1988), con excepción de la conductividad hidráulica saturada y la porosidad que fueron estimadas a partir del análisis granulométrico de muestras de suelo.

Como resultado de la simulación numérica se obtienen perfiles de saturación de agua que representan la redistribución de masa en el perfil de suelo. Para calcular la densidad del perfil se utiliza la siguiente expresión:

$$\rho(z, t) = (1 - \Phi)\rho_m + \theta(z, t)\rho_w, \quad (2)$$

donde Φ es la porosidad; ρ_m y ρ_w son la densidad de la matriz sólida y del agua, respectivamente. A partir de la expresión (2) se puede calcular la variación de la densidad con respecto al perfil inicial mediante la siguiente expresión:

$$\Delta\rho(z, t) = [\theta(z, t) - \theta(z, t_0)]\rho_w, \quad (3)$$

siendo t_0 el tiempo inicial de la simulación.

Asumiendo que la topografía es plana y utilizando la fórmula analítica de un cilindro vertical centrado en el GS, es posible estimar el efecto gravimétrico de la infiltración mediante la siguiente expresión:

$$\Delta g = 2\pi G \sum_{i=1}^N \Delta\rho(z_i, t) \{ \Delta z + (z_i^2 + R^2)^{1/2} - [(z_i + \Delta z)^2 + R^2]^{1/2} \} \Delta z, \quad (4)$$

siendo N el número de elementos finitos, Δz el tamaño de la malla, G la constante de gravitación universal ($6.674 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{s}^2\text{gr}$) y R el radio de influencia.

La metodología descrita es utilizada para analizar la infiltración en un perfil que representa las condiciones generales de los suelos de AGGO. El dominio de la simulación numérica es de 15 m con un nivel freático ubicado a 13 m de profundidad. El dominio fue discretizado con una malla uniforme de 400 nodos ($\Delta z = 3.75 \text{ cm}$) y un paso temporal de $\Delta t = 30 \text{ s}$.

Los eventos de lluvias analizados fueron registrados en la estación meteorológica de AGGO y corresponden a un evento suave de 27.6 mm (2/7/2016) y a otro más intenso de 74.1 mm (31/7/2016). Ambos eventos se consideran espacialmente uniformes ya que las tormentas en la zona de interés son generadas por sistemas frontales de escala espacial mucho mayor que el área de estudio. Además se asume que la escorrentía es despreciable y que la superficie del suelo no sufre deformaciones debido a la masa de agua.

Resultados y discusión

En primer lugar se analiza el efecto de la textura del suelo y el radio de influencia (R) sobre la gravedad. Para la simulación numérica se considera la precipitación más intensa. Las texturas seleccionadas corresponden a suelos arcillosos, limo-arcillosos y franco-arcillosos. Los resultados se ilustran en la Fig. 1 y se encuentran normalizados con la atracción gravitatoria producida por una placa infinita de Bouguer ($R = \infty$) para el

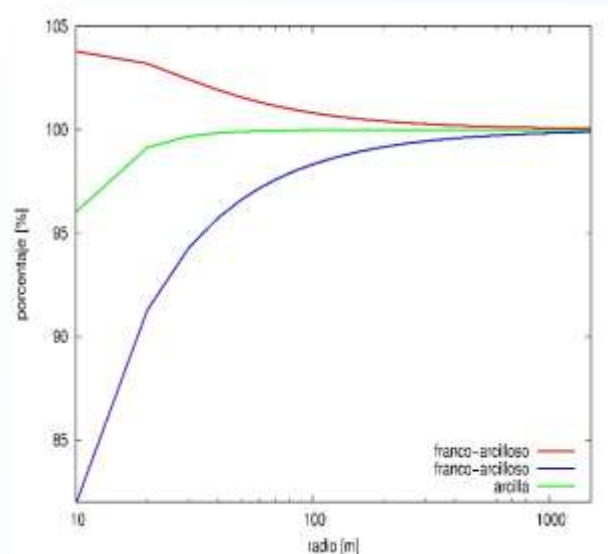


Figura 1: Radio de influencia en función de la textura del suelo

mismo evento de lluvia. En la gráfica se observa que para $R=100\text{m}$, el efecto gravimétrico representa más del 95% del efecto correspondiente a la placa infinita. Esto significa que la influencia de la textura sólo será significativa para eventos de infiltración a escala local ($R < 100\text{m}$). Notar que para el caso particular de un suelo franco-arcilloso el efecto gravitatorio puede ser localmente mayor al de la placa infinita de Bouguer ya que el agua es retenida mayormente en la parte superior del suelo.

Para analizar el efecto de la intensidad de la lluvia sobre las mediciones de gravedad, se analizaron las precipitaciones seleccionadas, considerando $R=100\text{m}$ y una textura similar a la de los suelos de AGGO. En la Fig. 2 se observan los resultados obtenidos. Como era de esperar el aumento en la gravedad producida por la lluvia intensa (Fig. 2-b) es mayor que el efecto generado por una lluvia suave (Fig. 2-a). La infiltración produce un “escalón” sobre la señal del GS que afectará al espectro de frecuencia estimado. Además se observa un descenso lineal en el efecto gravimétrico cuando cesa la lluvia que es generado por el flujo regional que se asumió igual a 2.2 mm/día .

Conclusiones

En el presente trabajo se presentó un modelado numérico del efecto gravimétrico producido por la infiltración de agua en un perfil de suelo. El modelo combina la resolución numérica de la ecuación de flujo mediante el método de elementos finitos con una fórmula analítica que permite estimar la variación de gravedad durante el proceso de infiltración. Con este modelo se analizaron los efectos sobre la gravedad local del radio de influencia, de las propiedades hidráulicas del suelo y de la intensidad de la precipitación. Los resultados del análisis paramétrico permiten concluir que el efecto de la precipitación es local ya que más del 95% del efecto se concentra en un radio de 100 metros. Las texturas de suelo producen una variación de gravedad que sólo es significativa para fenómenos a pequeña escala ($R < 100\text{m}$). En cuanto a la intensidad de la infiltración, el efecto gravimétrico resulta proporcional a la cantidad de lluvia caída.

En cuanto a la aplicación del modelo a las condiciones hidrogeológicas del predio de AGGO muestra que el efecto gravimétrico producido por las precipitaciones consideradas es del orden de 1 a 3 microgales (10 a 30 nm/s^2). Estos resultados constituyen una base teórica y metodológica que sientan las bases para futuros trabajos relacionados con el procesamiento y análisis de los datos del gravímetro

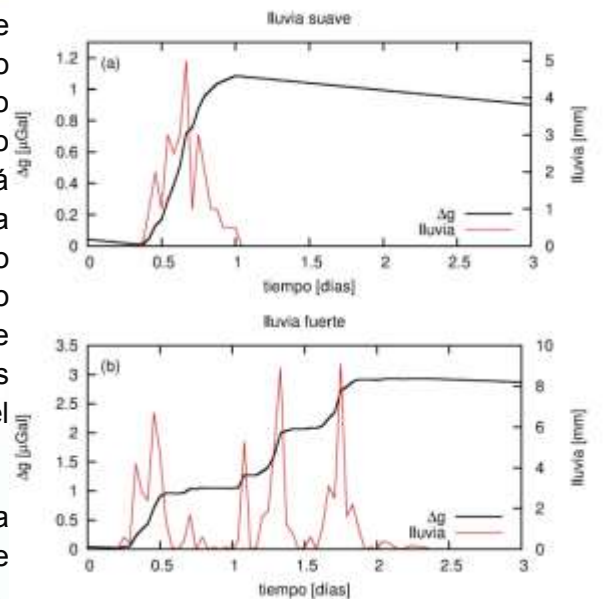


Figura 2: precipitaciones analizadas y su efecto gravimétrico



superconductor de AGGO, ya que el efecto gravimétrico de una precipitación debe ser correctamente modelada y removida de la señal del gravímetro para posteriores análisis con fines geodésicos .

Referencias

- Carsel, R. F. and R. S. Parrish, 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resources*, Vol. 24, 755-769.
- Celia, M. A., Bouloutas, E. T., Zarba R. L., 1990. A general mass-conservation numerical solution for unsaturated flow equation. *Water Resources Research*, 26, 1483-1496.
- Creutzfeld, B., A. Güntner, T. Klügel and H. Wziontek, 2008. Simulating the influence of water storage changes on the superconducting gravimeter of the Geodetic Observatory Wettzel, Germany. *Geophysics*, Vol. 73 (6), 95-104.
- Longuevergne, L., J. P. Boy, N. Florsch, D. Viville, G. Ferhat, P. Ulrich, B. Luck, and J. Hinderer, 2009. Local and global hydrological contributions to gravity variations observed in Strasbourg, *Journal of Geodynamics*, 48(3-5), 189-194
- Meurers, B., M. van Camp, T. Petermans, 2007. Correcting superconducting gravity time-series using rainfall modelling at the Vienna and Membach stations and application to Earth tide analysis. *J. Geodesy*, 81, 703-712.
- Naujoks, M., 2008. Hydrological information in gravity: observation and modelling. Phd Thesis in Geophysics, Friedrich-Schiller-University Jena.
- van Genuchten, M. T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892-898.