

## CONTENIDO

### Artículos

1. Universidad, sistemas educativos y carreras académicas: un enfoque sistémico..... 13-36  
**Herrera, Rodolfo.**
2. Sistema y lo sistémico en el pensamiento contemporáneo ..... 37-52  
**Herrera, Rodolfo.**
3. Propiedades a compresión de la mampostería de bloques de concreto..... 53-70  
**Navas, Alejandro.**
4. Capacidad estructural de juntas T de perfiles de acero laminado en frío ..... 71-86  
**Romanjek, Marija.**
5. Control adaptivo utilizando programación dinámica heurística..... 87-102  
**Gólcher, Luis.**
6. Análisis de la capacidad de drenado de celulosa de bagazo de caña..... 103-113  
**Aguilar, Noé.**

### Notas técnicas

1. Evaluación de los modelos utilizados en los estudios del control PID..... 117-129  
**Alfaro, Víctor.**
2. Cálculo para Costa Rica de la aceleración de la gravedad y su incertidumbre aplicando el método de Monte Carlo a la Fórmula Internacional de la Gravedad..... 131-138  
**Paniagua, Carlos.**
3. Traducción del resumen de la octava edición del SI brochure ..... 139-143  
**Paniagua, Carlos.**

### Análisis y comentarios

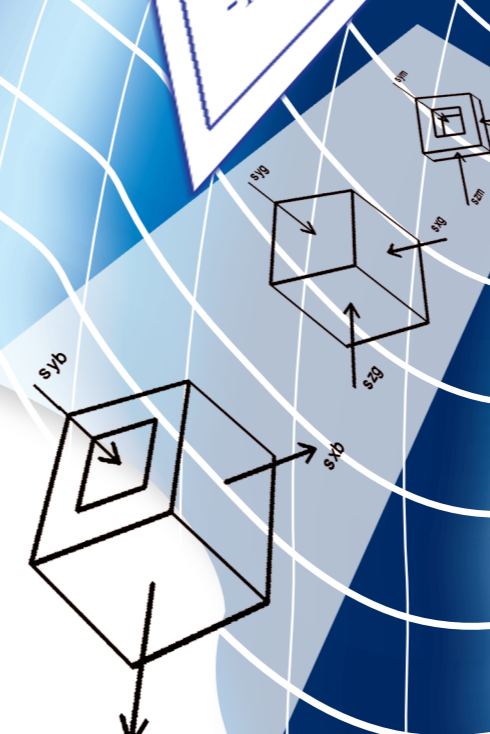
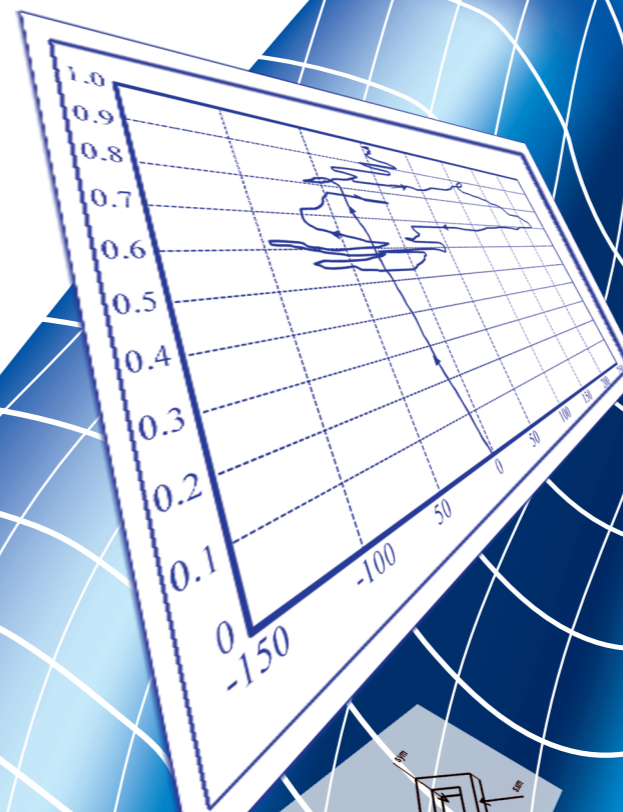
1. Reseña del libro La modernización entre cafetales. San José, Costa Rica, 1880:1930 ..... 147-149  
**Sanou, Ofelia.**

### Trabajos de Graduación 2007

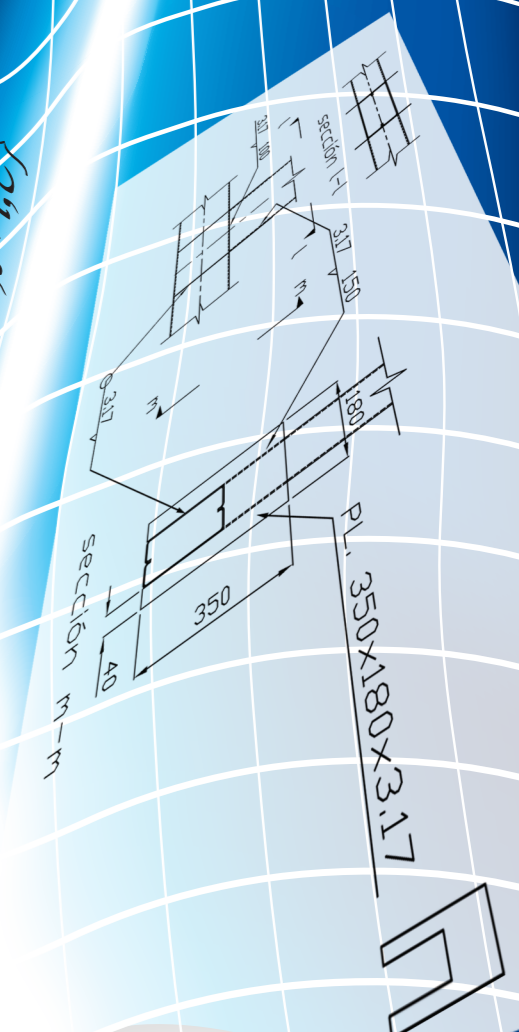
- Lista de proyectos de graduación de grado y posgrado del año 2007 de la Facultad de Ingeniería ..... 153-170

### Normas

- Normas para la presentación de artículos a la Revista Ingeniería..... 173-180



INGENIERÍA  
C.A. & M.C.



# CÁLCULO PARA COSTA RICA DE LA ACELERACIÓN DE LA GRAVEDAD Y SU INCERTIDUMBRE, APLICANDO EL MÉTODO DE MONTE CARLO A LA FÓRMULA INTERNACIONAL DE LA GRAVEDAD

*Carlos Paniagua Vásquez*

## Resumen

Se determinó la aceleración de la gravedad ( $g$ ), con su incertidumbre asociada y a un nivel adecuado, para su uso en todo el territorio continental de Costa Rica y para aquellas aplicaciones más comunes de la metrología, por medio del método de Monte Carlo aplicado a la Fórmula Internacional de la Gravedad.

Se obtuvo el mejor estimado de  $g$  en  $9,775\ 89\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$  y la incertidumbre estándar asociada de  $0,003\ 41\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ .

El tipo de incertidumbre alcanzado permite el uso de este valor en laboratorios secundarios que requieran, para sus usos, una incertidumbre mayor o igual que  $0,003\ 41\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ .

**Palabras clave:** aceleración de la gravedad, Fórmula Internacional de la Gravedad, Monte Carlo, usos generales metrología.

## Abstract

It was determined gravity acceleration ( $g$ ), with its uncertainty budget, at an suitable level fitness for purposes for use it in all the continental territory of Costa Rica, for common applications of the metrology, by the Monte Carlo method applied to the International Formula of Gravity.

The following result was obtained: best estimate is  $9,775\ 89\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$  and standard uncertainty  $0,003\ 41\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ . The difference in this value is not significant at the 66% level, two tails, with the experimental value of the Laboratory Costarricense de Metrología, LACOMET (2008).

Its uncertainty allows the use of this value in secondary laboratories that require, for its uses, a relative uncertainty greater o equal than 0,000 35.

**Key words:** gravity acceleration, International Gravity Formula, Monte Carlo, general uses in metrology.

**Recibido:** 16 de julio del 2008 • **Aprobado:** 17 de agosto del 2008

## 1 INTRODUCCIÓN

La fuerza de la gravedad permite definir el peso de un objeto, mantenemos en la superficie de la Tierra sin ser expulsados de ella y es el origen de la caída libre de los cuerpos. Esta fuerza es proporcional a la masa:  $F = m \cdot g$ , en donde  $g$  es la **aceleración de la gravedad**. Van Camp, Camelbeeck, & Richard (2003) se refieren a esta como una magnitud que depende, principalmente, de la altura sobre el nivel

del mar, de la latitud, y con una dependencia menor de la distribución de la masa interior y la rotación de la Tierra; la posición relativa de la Tierra con el sol y la luna, que causa las mareas.

En metrología,  $g$  interviene en la definición de las unidades derivadas del kilogramo, (entre otras el ampére, newton, pascal) y en la subsecuente determinación de las magnitudes correspondientes. Van Camp, Camelbeeck, & Richard (2003) son de

la opinión de que juega un papel muy importante en la nueva realización del kilogramo. El enfoque más prometedor es el de la balanza de Watt, que permite la definición del kilogramo en términos del metro, el segundo y la constante de Plank, ( $h$ ), lo que permite unir la masa a la potencia eléctrica que es medido en términos de los efectos de Josephson y Hall cuántico.

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Fórmula para el cálculo de $g$

En 1979 la International Association of Geodesy (IAG) adoptó el Sistema Geodésico de Referencia 1980 (GRS80), que condujo al Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS84), y a la Fórmula Internacional de la Gravedad (IGF) según lo establecen Featherstone & Dentith (1997), conocida también como fórmula somigliana, ecuación (1).

$$g = g_e \frac{1 + k \sin^2 \phi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}} \quad (1)$$

En donde:

$k$  es la constante normal de la gravedad, adimensional;

$g_e$  es la gravedad normal en el ecuador; en  $m \cdot s^{-2}$ ;

$e^2$  es el cuadrado de la primera excentricidad numérica; y

$\phi$  es la latitud geodésica del elipsoide terrestre medio.

Los valores para estas constantes se muestran en el Cuadro 1.

Este modelo funciona muy bien en la superficie del elipsoide, pero falla cuando uno se mueve lejos de esa superficie, este cambio con la altura se corrige y se obtiene la ecuación (2).

**Cuadro 1.** Valores para las constantes

Constante	GRS80
$g_e$ ( $m \cdot s^{-2}$ )	9,780 326 771 5
$k$	0,001 931 851 353
$e^{-2}$	0,006 694 380 022 90

Fuente: (Featherstone & Dentith, 1997).

En donde:

$H_p$  es la altura sobre el nivel del mar en m; y

$-3,086 \cdot 10^6$  es el coeficiente de corrección de la altura sugerido por Hofmann-Wellenhof & Moritz (2005), adimensional,

Con base en la ecuación (2) y con las premisas siguientes se realizan los cálculos.

### 2.2 Posición geográfica de Costa Rica

#### • Puntos extremos de latitud

Esta información fue suministrada por el Instituto Geográfico Nacional (2008).

- Sur: 08° 02' 26" (Punta Burica, punto más meridional del territorio continental).
- Norte: 11° 13' 12" (lugar donde el Río Sapoá entra a Nicaragua).

En notación decimal se tiene:

- Latitud sur: 8,040 56°
- Latitud norte: 11,220 00°

#### • Puntos extremos de altitud

Esta información fue suministrada, vía correo electrónico, por el Instituto Geográfico Nacional (2008).

- 0m, nivel del mar
- 3819m sobre el nivel del mar, Cerro Chirripó

$$g = \left\{ 9,780\,326\,771\,5 \cdot \left[ \frac{1 + 0,001\,931\,851\,353 \cdot \sin^2(\phi)}{\sqrt{1 - 0,006\,694\,380\,022\,90 \cdot \sin^2(\phi)}} \right] - 3,086 \cdot 10^{-6} \cdot H_p \right\} \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \quad (2)$$

### 2.3 Premisas

Para la latitud, el valor mínimo es  $a = 8,040\,56^\circ$  y el máximo  $b = 11,220\,00^\circ$ ; se puede asignar a la latitud una distribución rectangular con un rango  $[a; b]$ . La función de distribución de probabilidad (FDP) está dada por la ecuación (3).

$$g_\phi(\xi) = \begin{cases} 1/(b-a) & a \leq \xi \leq b \\ 0 & \text{demás valores} \end{cases} \quad (3)$$

Con mejor expectativa y varianza:

$$E(\phi) = \frac{a+b}{2} \quad (4)$$

En donde:

$E(\phi)$  es la expectativa o valor esperado de la latitud, expresado en grados ( $^\circ$ ).

Y con varianza

$$V(\phi) = \frac{(a+b)^2}{12} \quad (5)$$

En donde:

$E(\phi)$  es la varianza de la latitud, expresado en grados al cuadrado ( $^\circ$ )<sup>2</sup>.

Para la altura, las consideraciones son análogas con  $c = 0$  m y  $d = 3\,819$  m, con un rango de  $[c; d]$ . La FDP estará dada por:

$$g_{H_p}(\xi) = \begin{cases} 1/(d-c) & c \leq \xi \leq d \\ 0 & \text{demás valores} \end{cases} \quad (6)$$

Y con mejor expectativa y varianza:

$$E(H_p) = \frac{c+d}{2} \quad (7)$$

$$V(H_p) = \frac{(c+d)^2}{12} \quad (8)$$

Con esta información se puede predecir el valor de la ecuación (2) propagando sus FDP y obtener del resultado: la FDP, la expectativa y la varianza de  $g$ . (ecuación 9)

Se pueden propagar las FDP ya que cumplen los requisitos para propagación de distribuciones que estipula el Suplemento 1 a la GUM BIPM, (2006):

- $f$  es continua con respecto a los elementos de entrada  $X_i$  de  $X$  en las cercanías de los mejores estimados  $x_i$  de  $X_i$ ;
- la FDP de salida  $Y$  es continua
- la FDP de salida  $Y$  es unimodal

$$g = \left\{ \begin{array}{l} 9,780\,326\,771\,5 \cdot \left[ \frac{1 + 0,001\,931\,851\,353 \cdot \sin^2(8,04^\circ \leq \phi \leq 11,22^\circ)}{\sqrt{1 - 0,006\,694\,380\,022\,90 \cdot \sin^2(8,04^\circ \leq \phi \leq 11,22^\circ)}} \right] \\ - 3,086 \cdot 10^{-6} \cdot (0 \leq H_p \leq 3\,819) \end{array} \right\} \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \quad (9)$$

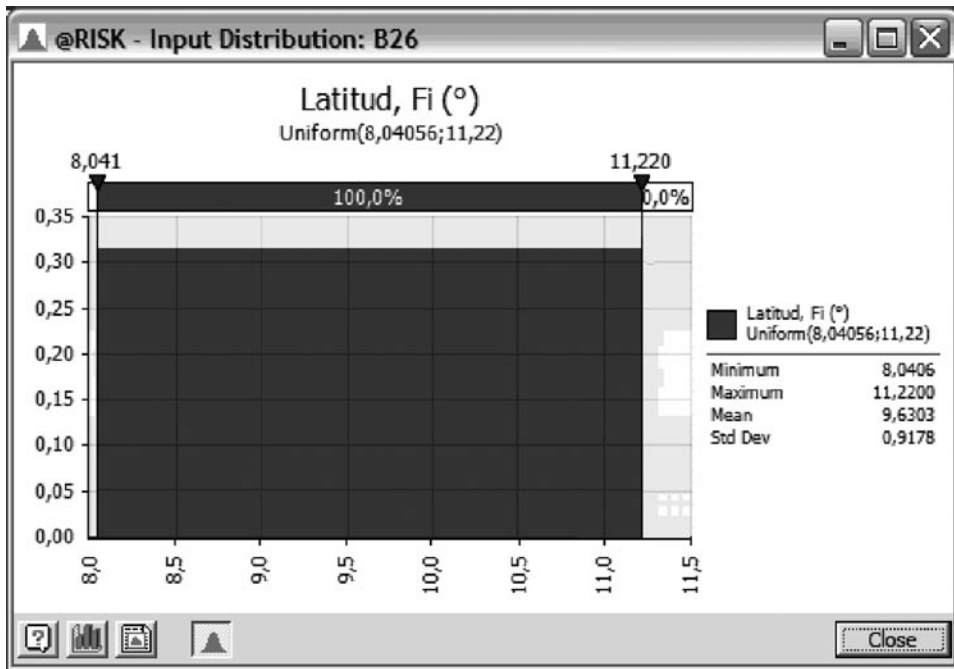


Figura 1. FDP de  $\phi$  ( $8,04^\circ \leq \phi \leq 11,22^\circ$ ).

Fuente: (xxxx)

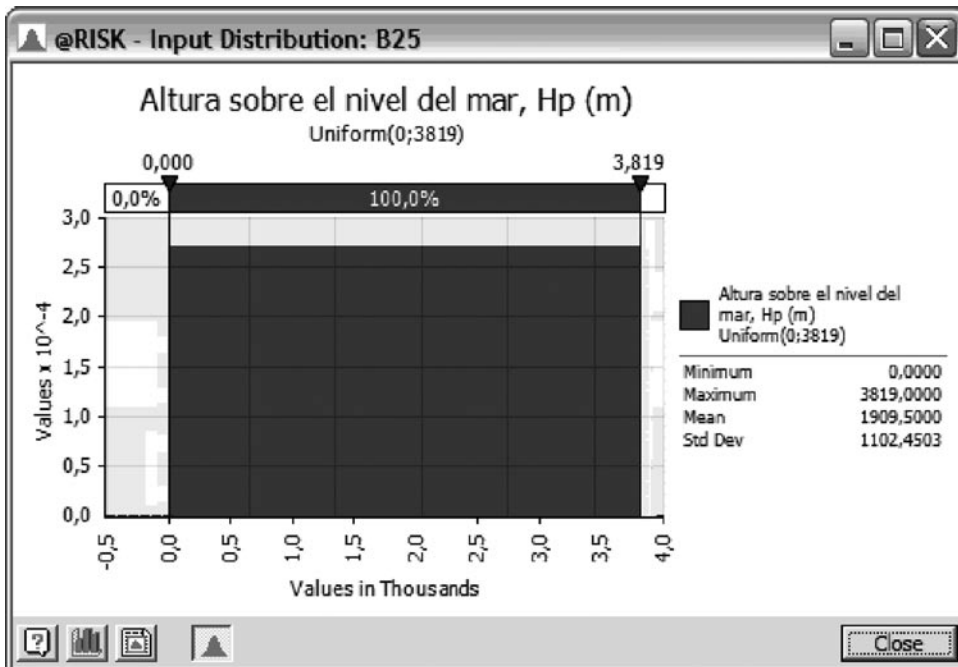


Figura 2. FDP de  $H_p$  ( $0 \text{ m} \leq H_p \leq 3\,819 \text{ m}$ ).

Fuente: (xxxx)

## 2.4 Programación

No fue necesario desarrollar ningún tipo de programación para realizar los cálculos, se usó *@Risk 5.0*, complemento de *Excel®* que cumple con los requisitos de usar el algoritmo de Wichmann and Hill para la generación de números pseudoaleatorios pedido por la GUM, BIPM (1995), ya que usa la función interna de *Excel®* para la generación de los pseudonúmeros aleatorios. *@Risk 5.0* permite propagar las FDP por medio del método de Monte Carlo.

## 2.5 Información proporcionada a *@Risk 5.0*. (Nota: no se realizó ningún redondeo intermedio)

Para visualizar fácilmente la información proporcionada a *@Risk*, se resume la ecuación (9) a:

$$g = \left\{ k_1 \cdot \left[ \frac{1 + k_2 \cdot \sin^2(\phi)}{\sqrt{1 - k_3 \cdot \sin^2(\phi)}} \right] - k_4 \cdot H_p \right\} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

con  $8,04^\circ \leq \phi \leq 11,22^\circ$  y  $0 \leq H_p \leq 3\,819$

Y se alimenta con la información mostrada en el Cuadro 2.

## 3 RESULTADOS

### 3.1 FDP del predicho de *g* obtenido

### 3.2 Convergencia

Se realizaron pruebas variando el número de iteraciones, para determinar la convergencia a tres niveles, los resultados se muestran en el Cuadro 3.

**Cuadro 2.** Información alimentada a *@Risk 5.0*.

Datos			
Latitud mínima (°)	8,040 56	Altura mínima (m)	0
Latitud máxima (°)	11,220 00	Altura máxima (m)	3819
Predicho		Suposiciones	
<i>g</i> (m·s <sup>-2</sup> )	<b>9,780 327 ecuación 2</b>	<i>H<sub>p</sub></i> m	0 m ≤ <i>H<sub>p</sub></i> ≤ 3 819 m
<i>k<sub>1</sub></i>	9,780 326 771 5	φ°	0, 04° ≤ φ ≤ 11,22°
<i>k<sub>2</sub></i>	0,001 931 851 353	φ rad	φ° · π / 180
<i>k<sub>3</sub></i>	3,086E-06	sen(φ)	
<i>k<sub>4</sub></i>	0,006 694 380 022 90	sen <sup>2</sup> (φ)	

Fuente: (Feathersotne & Dentith, 1997) y (Hofmann-Wellenhof & Moritz, 2005).

**Cuadro 3.** Valores predichos de *g* y su desviación estándar, de acuerdo con el número de iteraciones.

Número de iteraciones	Valor predicho (m·s <sup>-2</sup> )	Desviación estándar (m·s <sup>-2</sup> )
10 000 000	9,775 891	3,41E-03
5 000 000	9,775 891	3,41E-03
1 000 000	9,775 891	3,41E-03

Fuente: (El autor).

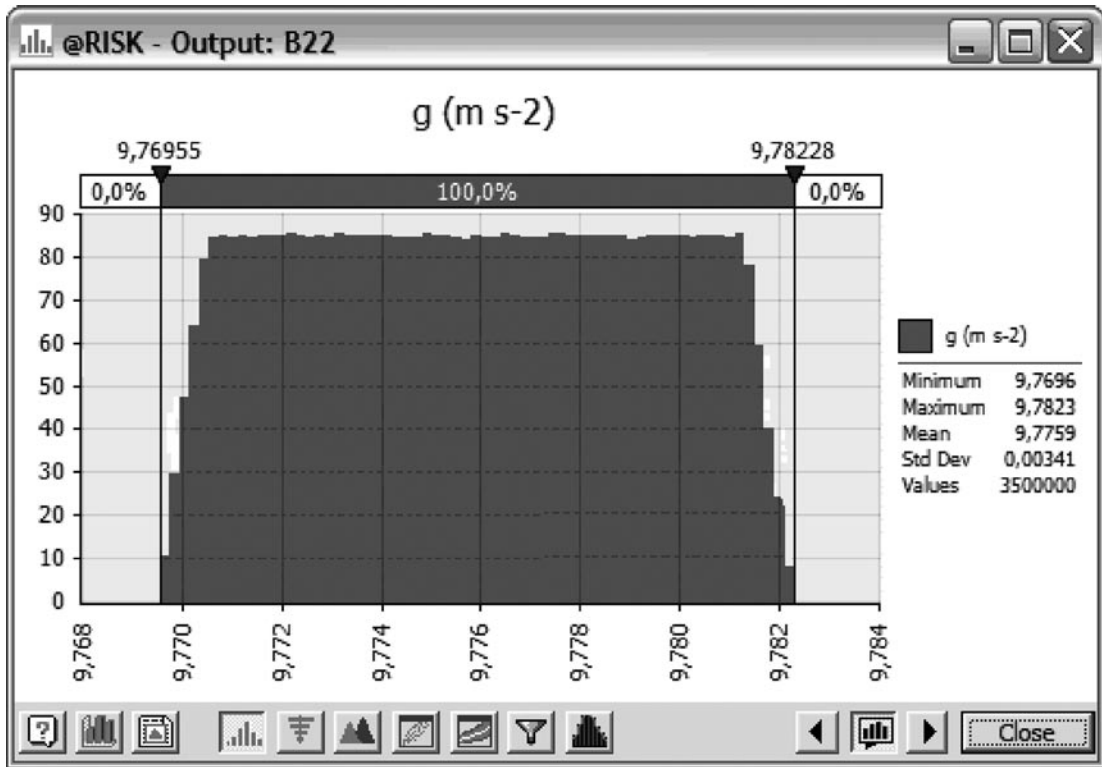


Figura 3. Predicho  $g$  ( $m \cdot s^{-2}$ ), altura sobre nivel del mar,  $H_p$  ( $0 m \leq H_p \leq 3\ 819 m$ ) y latitud,  $\phi$  ( $8,04^\circ \leq \phi \leq 11,22^\circ$ ).

Fuente: (xxxx)

Cuadro 4. Información proporcionada por @Risk 5.0.

Name	$g$ ( $m \cdot s^{-2}$ )	Altura sobre el nivel del mar, $H_p$ (m)	Latitud, $Fi$ ( $^\circ$ )
Description	Output	Risk Uniform (B17; B18; RiskName ("Altura sobre el nivel del mar, $H_p$ (m)"))	Risk Uniform (B15; B16; Risk Name ("Latitud, $Fi$ ( $^\circ$ )"))
Cell	B22	B25	B26
Minimum	9,769554	2,78E-03	8,040561
Maximum	9,782277	3818,998	11,22
Mean	9,775891	1909,5	9,63028
Std Deviation	3,41E-03	1102,451	0,9178257
Variance	1,16E-05	1215398	0,8424041
Skewness	1,08E-04	-1,49E-09	-8,01E-10
	<b>Estadístico</b>		<b>Valor predicho</b>
	Número de iteraciones		10 000 000
	Promedio ( $m \cdot s^{-2}$ )		9,775 891
	Desviación estándar ( $m \cdot s^{-2}$ )		0,003 413

Fuente: (@Risk 5.0)

### 3.3 Redondeo

De acuerdo con la información del numeral 3.2 y la tolerancia numérica (semiintervalo que contiene todos los números que pueden ser expresados con un número significativo de dígitos decimales) asociada a un valor, descrita en el Suplemento 1 a la GUM, BIPM, (2006), se puede tener certeza que esta corresponde al menos a  $0,000\,001\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ .

### 3.4 Obtención de la información

La información que brinda @Risk 5.0 se muestra en el Cuadro 4.

**3.5 Expresión de los resultados:** los resultados considerados adecuados para uso en todo el país, para aplicaciones con una incertidumbre límite de  $0,003\,4\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  son:

Mejor estimado ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ) **9,775 89**

Incertidumbre estándar asociada ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ) **0,003 41**

**Nota:** Se da un número excesivo de decimales para no perder información de acuerdo con el numeral 7.2.6 de la GUM, BIPM, (2006).

## CONCLUSIONES

Se comparó este valor con el valor experimental obtenido en el Laboratorio Costarricense de Metrología, LACOMET (2008):  $9,779\,06\text{ m/s}^2$  y se comprobó que no es significativamente diferente, a un nivel de confianza del 68 %, a dos colas.

El tipo de incertidumbre alcanzado permite el uso de este valor en laboratorios secundarios que requieran, para sus usos, una incertidumbre relativa mayor o igual que  $0,000\,35$ .

## NOTA

Para este trabajo se usó software comercial; la identificación de este no implica una recomendación por parte del autor del INII, ni que esta sea la mejor opción del mercado.

Commercial software were used for this work, such identification does not imply a recommendation by the author or by the INII, nor does it imply that this software are necessarily the best available for the purpose.

## AGRADECIMIENTO

Se reconocen los aporte técnicos y comentarios, así como la revisión integral de este documento, a los funcionarios del Instituto de Investigaciones en Ingeniería (INII): MSc. María Lorena Blanco Rojas, Ph.D. Gerado Padilla Víquez y al Ing. Raziel Sanabria Sandí.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIPM Joint Committee for Guides in Metrology. *JCGM 101: 2008. Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Propagation of distributions using a Monte Carlo method.* (2008). Sèvres: BIPM.

Feathersotne, W. & Dentith M. (1997). A geodetic approach to gravity data reduction for geophysics. *Computer & Geoscience*, 23, (10).

Hofmann-Wellenhof, B. & Moritz, H. (2005). *Physical Geodesy*, NewYork: SpringerWein.

Instituto Geográfico Nacional. Recuperado el 20080616 10:30 h [http://www.mopt.go.cr/ign/geografia\\_posicion.html](http://www.mopt.go.cr/ign/geografia_posicion.html).

Instituto Geográfico Nacional. Benavides, L.. Mensaje a: <carlosbpaniagua@gmail.com>, Jul 16, 2008 at 1:27 PM. Message-Id: 487E4BB9.00001D.02188@IGNACUÑA. Comunicación personal.

ISO. *ISO/IEC Guide 98:1995. Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*. Genève: ISO.



Laboratorio Costarricense de Metrología.  
*CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN,*  
*LACOMET 08330308.* 2008-06-18

Van Camp, M., Camelbeeck, T. & Richard, P. (2003).  
The FG5 absolute gravimeter: metrology and  
geophysics. *Physicalia Magazine, Journal of*  
*the Belgian Society*, 25 (3), 161-174.

### **SOFTWARE UTILIZADO**

@RISK 5.0 Industrial (2008). Palisade  
Corporation 798 Cascadilla Street Ithaca,  
NY 14850-3239, USA.

Microsoft ® Office Excel 2003, SP3. Microsoft  
Corporation, One Microsoft Way Redmond,  
WA 98052-6399, USA.

### **SOBRE EL AUTOR**

**Carlos B. Paniagua Vásquez**

Licenciado en Química

Investigador Invitado del Instituto de  
Investigaciones en Ingeniería

Universidad de Costa Rica

Teléfono: (506) 2202- 6159

Facsímil: (506) 2253-4617

Correo electrónico: carlosbpaniagua@gmail.com