

LA OBRA DE PIERRE BOUGUER EN LA NUEVA GRANADA Y EL DESCUBRIMIENTO DE LA GRAVIMETRIA

Por Armando Espinosa B.²

La verdadera historia de los hombres es la historia de las actividades humanas. La tradicional historia política y militar sólo constituye el resumen o la cristalización de todo el trajín humano, y es para el estudioso un simple marco de referencia alrededor del cual se teje la auténtica aventura del hombre y de las sociedades. Dentro de esta perspectiva, la ciencia, con sus logros, sus vacilaciones, y sus limitaciones, adquiere una nueva dimensión, pues viene a constituirse en un guía fundamental de la actividad humana. Nada más característico de un pueblo que su nivel de conocimientos, sus realizaciones y sus industrias. Ellos miden sus grados de creatividad y de originalidad, que son la esencia del verdadero desarrollo. Estos lineamientos nos han conducido, inicialmente al estudio de las ciencias, luego al de la historia del pensamiento científico.

Queremos referirnos en esta ocasión a los trabajos científicos de una expedición enviada al Virreynato de la Nueva Granada, más exactamente a la Presidencia de Quito, en 1735. Sus escritos y relatos conmovieron en su época no solamente al mundo de la ciencia sino al de la filosofía, al de las letras, y hasta al mundo de la política, y hoy en día nos conmueven aún a los hombres de ciencia y a los historiadores. Se trata de la Expedición Franco-Española, conocida familiarmente con el nombre de Expedición de La Condamine. Entre los numerosos y muy valiosos trabajos de la Expedición destacaremos las contribuciones que el matemático y astrónomo Pierre Bouguer hizo a la geografía, a la geología, y a la geofísica, y el descubrimiento de una nueva rama de la geofísica: La gravimetría. Los

resultados que vamos a presentar son totalmente novedosos, pues algunos grandes aportes de Bouguer han sido desconocidos, incluso en su propio país.

Al empezar el siglo XVIII, en el hervidero de las ideas del naciente siglo de las Luces, surgen confrontaciones y polémicas científicas y filosóficas. Los grandes descubrimientos del siglo XVI habían confirmado que la Tierra era redonda, y desde entonces los geógrafos y los cartógrafos empezaron a considerarla como una esfera. Finalizando el siglo XVII, Newton lanza la hipótesis de una Tierra achatada hacia los polos por efecto de la rotación. Entonces empieza una de las más célebres controversias, no solamente científicas sino filosóficas, comerciales, y hasta políticas. El mundo se divide en dos bandos: aquellos que alrededor de Newton creen en una Tierra aplastada hacia los polos, y los que con el grupo de los astrónomos franceses de la familia Cassini afirman que la Tierra es más bien alargada hacia los polos. La polémica es un motivo más de enfrentamiento entre dos escuelas filosóficas, la inglesa y la francesa, y entre dos naciones cuyas rivalidades son ancestrales. La gran figura de Voltaire entra en la contienda en favor de Newton, después de haber pasado varios años en Inglaterra y tras haber traído las ideas filosóficas inglesas a Francia. Los Cassini son cartógrafos oficiales de la corona francesa, y los marinos y comerciantes comienzan a quejarse de algunas imprecisiones en sus mapas. Hacia 1730 la figura de la Tierra, como comúnmente se convino llamar al asunto, es uno de los principales problemas del mundo y entonces el ministro Maurepas logra convencer al rey Luis XV para que financie un grandioso proyecto de la Academia de Ciencias de París cuyo objetivo será encontrar una solución a la cuestión. Se enviarán dos expediciones: una hacia el círculo polar, la otra hacia el círculo ecuatorial. Ambas medirán la distancia correspondiente

1 Disertación presentada en la toma de posesión como Académico Correspondiente, el 23 de marzo de 1988.

2 INGEOMINAS, A.A. 695, Popayán.

a un grado de latitud. Si las dos distancias son iguales la Tierra es esférica; si una de las distancias es mayor, entonces se deducirá si la Tierra es achatada o alargada hacia los polos.

El astrónomo y matemático Pierre Bouguer conforma, junto con Carlos María de La Condamine, Luis Godin y José Jussieu la expedición al Ecuador, la cual es enviada a la entonces llamada Presidencia de Quito, acompañada por los jóvenes científicos españoles Jorge Juan y Antonio de Ulloa.

Pierre Bouguer es conocido en el mundo de la ciencia por su participación en los trabajos geodésicos de la Expedición Franco-Española. Sin embargo, además del aspecto geodésico Bouguer, trabajador incansable, se ocupó de muchos problemas científicos, y publicó sus resultados en las obras sobre la expedición. Paradójicamente, tal vez dada la resonancia que tuvo en la época de Bouguer la discusión sobre la forma de la Tierra, los trabajos geodésicos opacaron completamente el resto de la obra. En ella se encuentran, no obstante, contribuciones de gran importancia que no han sido equitativamente evaluadas por los historiadores de la Ciencia.

Las observaciones y anotaciones de Bouguer sobre la Nueva Granada son de varios tipos. Aunque Bouguer, como ya se ha dicho, era ante todo matemático y astrónomo, poseía una inteligencia inquieta y polifacética, y sus intereses cubrían campos tan diversos como la geografía, la náutica y la óptica, fuera de los ya mencionados. Durante la expedición pudo recorrer varias provincias de la Presidencia de Quito, y al terminar los trabajos geodésicos se separó de sus compañeros para regresar a Francia por la vía Quito-Popayán-Cartagena. Durante el viaje realizó muchas observaciones, e hizo los primeros levantamientos topográficos del Magdalena. Su aporte más importante está sin embargo en el descubrimiento de las leyes de la gravimetría, hecho en las faldas del Chimborazo, con el cual fundó una nueva disciplina de las Ciencias de la Tierra.

Los resultados de las investigaciones de Bouguer en Suramérica aparecen esencialmente en dos obras. La primera es **La Figura de la Tierra**, escrita por Bouguer y su compañero de viaje Carlos María de La Condamine. La segunda es la **Relación Abreviada del Viaje al Perú**, más conocida como **Viaje al Perú**, presentada por Bouguer a la Academia de Ciencias de París en 1744. Si **La Figura de la Tierra** es por excelencia la obra científica de la expedición, el **Viaje al Perú**, más general y descriptivo, no deja de presentar gran interés; ante todo por su diversidad, pues en él Bouguer da rienda suelta a sus numerosas inquietudes científicas y se revela agudo observador, luego por su importante contribución geográfica.

Pierre Bouguer, cuyo retrato hecho por Peronneau está en el Museo del Louvre, nació en Croisic, Baja Bretaña (Francia) el 16 de Febrero de

1698. Con la ayuda de su padre, profesor de hidrografía, perfeccionó sus conocimientos y obtuvo a la edad de quince años el título de profesor. En 1731 había ya ganado tres premios de la Academia de Ciencias como miembro asociado, y en 1735 obtuvo la categoría de miembro ordinario.

En 1735 la Academia de Ciencias organiza la célebre expedición al Ecuador. Bouguer es escogido como miembro de la expedición, y encargado de la parte astronómica. Iniciada en el puerto de La Rochelle en mayo del mismo año, la expedición sigue el itinerario Cartagena-Panamá—Guayaquil-Quito. Los trabajos duran hasta 1743, cuando sus miembros se separan en Quito para regresar cada uno por su lado.

De regreso a Francia en 1744 Bouguer sigue estudiando, además de los materiales traídos de Suramérica, cuyos resultados publica en 1749 con La Condamine, varios temas de física y de navegación. En el campo de la óptica hace notables contribuciones que le valen la celebridad, las cuales reúne en su último libro, el **Tratado de óptica sobre la gradación de la luz**. Bouguer muere en París en 1758. Su curiosa personalidad hizo perder reconocimiento a sus importantes trabajos en Suramérica. En favor de su compañero, menos brillante científicamente, Carlos María de La Condamine. Bouguer fue en efecto persona severa, poco comunicativa y hasta taciturna. Se dice que sólo contaban para él sus trabajos científicos, los que llegó a querer como a su propia vida. No es de extrañar entonces que La Condamine, hábil diplomático y hombre de mundo, haya recibido todos los honores de la expedición. Esta se conoce comúnmente como la Expedición de La Condamine, aunque si por resultados científicos nos guiáramos, bien pudiera llamarse más bien Expedición de Bouguer.

LA OBRA GEOGRAFICA

Toda la obra de Bouguer sobre el norte del continente Suramericano está impregnada de observaciones geográficas. Bouguer es en realidad uno de los últimos cronistas del período colonial, y el **Viaje al Perú** es particularmente rico en anotaciones sobre todas las regiones que la expedición visitó. Bouguer no se limitó a describir las montañas, la flora, la fauna y las riquezas minerales de la zona, sino que se extendió en observaciones sobre los habitantes, sus costumbres, sus condiciones de vida y otros aspectos humanos. Es todo esto lo que se podría llamar la obra geográfica dispersa.

La obra geográfica propiamente dicha fue realizada por Bouguer durante su regreso a Europa por la vía Quito-Cartagena, por el río Magdalena. Quiso rivalizar con su compañero La Condamine, quien en la compañía del quiteño Pedro Maldonado regresó a Francia bajando el río Amazonas y ¿levantando el mapa de la cuenca? Es bien posible que sí. En todo caso Bouguer es bien claro al afirmar que al iniciar el viaje uno de los objetivos era estudiar el río Magdalena y que prefirió el paso de Guanacas,

y no el del Quindío, para llegar más rápidamente a sus orillas.

Es precisamente en el levantamiento del primer mapa del Magdalena donde reside la principal contribución geográfica de Bouguer a la Nueva Granada. El trabajo consistió en la determinación de la posición geográfica en términos de latitud y longitud, de una serie de puntos para levantar un mapa. En el Viaje al Perú aparecen las tablas de resultados. La longitud fue determinada con relación a la longitud de Quito y verificada en Cartagena, donde ya Bouguer había hecho mediciones durante el viaje de ida.

LA OBRA GEOLOGICA

Si la obra de Pierre Bouguer es rica en anotaciones geográficas, lo es más en observaciones geológicas. En Bouguer se conjugan el físico y el naturalista para dar a la obra científica una notable originalidad. Si bien es cierto que muchos antes de él se preocuparon por las propiedades físicas de la Tierra, quizás nadie lo hizo con un enfoque naturalístico. Sobre el particular, Bouguer tuvo la fortuna de haber viajado; en sus obras se percibe claramente hasta qué punto sus viajes de exploración en Suramérica despertaron en él al naturalista. Su mérito es aún mayor si se tiene en cuenta que hasta la primera mitad del siglo XVII la ciencia geológica se encontraba en un estado verdaderamente incipiente.

La obra geológica de Bouguer se encuentra prácticamente circunscrita a los capítulos III y IV del Viaje al Perú, consagrados respectivamente a la naturaleza del terreno, los volcanes y terremotos, y al regreso de Quito a Cartagena por el Magdalena. El primer aspecto que llama la atención de Bouguer es la riqueza minera de la región, especialmente de la Provincia de Popayán, en la cual estaba incluido el Chocó en aquella época. Distingue dos tipos de depósitos: el de las partes bajas de la cordillera donde el oro, según él, ha sido depositado por el agua (oro aluvial en términos actuales), y el de mina propiamente dicho, situado en las partes altas de las montañas (oro filoniano). Bouguer sólo pudo ver yacimientos del primer tipo, y da de ellos una descripción relativamente detallada, no solamente en lo que se refiere a los depósitos mismos sino en cuanto a las técnicas utilizadas para su explotación. La metalurgia del oro fue uno de los puntos de interés de Bouguer, quien tuvo el mérito de publicar una de las primeras descripciones de los métodos utilizados en el Chocó para beneficiar el oro. Como, por obvias razones, los autores españoles publicaron pocos datos sobre el tema, las informaciones de Bouguer son muy valiosas. Señala que se utiliza con frecuencia la técnica de la batea, añadiendo a veces algunos zumos de plantas, que juegan el papel aglutinante. En otros casos, cuando hay presencia de minerales magnéticos, se utiliza el imán para separarlos. Pero sobre todo Bouguer describe por primera vez una técnica utilizada para separar el platino del oro, la amalgamación con mercurio. Bouguer anota que el platino es una

“especie de pirita particular del país”, y que son rudimentarios los procedimientos para separarla, dando luego una descripción de ellos.

Los datos de Bouguer son muy interesantes para efectos de una discusión sobre el descubrimiento del platino. Este ha sido atribuido tradicionalmente a Don Antonio de Ulloa, compañero de Bouguer en la expedición, por su referencia al platino en el libro titulado *Relación Histórica de un Viaje a la América Meridional*, publicado en 1748, un año antes del *Viaje al Perú* de Bouguer. Este descubrimiento es actualmente cuestionado por nosotros, con base en documentos de la Casa de Moneda de Santa Fé, que comprueban que ya en 1726 el platino se separaba del oro y se dosificaba, en operaciones rutinarias de la Casa de Moneda. Las descripciones de Bouguer comprueban que también los mineros del Chocó hacían separación del platino con técnicas que, lógico es suponerlo, debían datar de al menos el principio del siglo XVIII.

Sobre los volcanes, las anotaciones de Bouguer son bastante pertinentes. Empieza señalando que muchas capas que se observan en los valles profundos del Ecuador, algunas veces bastante alejados de posibles volcanes, son, no el resultado de depósitos de aluvión, sino productos arrojados por los volcanes. Esta identificación de fenómenos volcánicos con base en la sola observación de las rocas es bastante notable para la época. En el siglo XVIII por ejemplo, se desconoció el carácter volcánico de la gran región de Auvernia en Francia y fue solamente hacia 1765 cuando, después de grandes polémicas, Jean-Etienne Guettard pudo imponer su hipótesis sobre los volcanes de la Cadena del Puy de Dome.

Bouguer da descripciones bastante detalladas del volcán Cotopaxi, y de la erupción de 1742, de la cual fue testigo directo. Uno de los fenómenos que describe con un admirable acierto es el efecto de un flujo de lodo que fue provocado por la erupción. Verdadero maestro de la observación, Bouguer saca conclusiones que quizás muchos geólogos del siglo XX no lograrían, en particular sobre el origen y mecanismo del flujo. Igual pertinencia muestra Bouguer al tratar el problema de los terremotos. Combate muchas ideas supersticiosas de la época y plantea interesantes opiniones sobre sus causas, después de señalar varios terremotos notables que pudo observar, o al menos sus consecuencias.

En geomorfología, el Viaje al Perú contiene algunas interesantes y novedosas ideas, especialmente en cuanto al origen de los valles. Bouguer observa los profundos cañones por donde corren los ríos cerca de Quito y concluye que fueron formados precisamente por la erosión de los mismos ríos.

LA GRAVIMETRIA

La contribución fundamental de Bouguer está en el descubrimiento de la Gravimetría. La aceleración de la gravedad, tomada de la fórmula general

de la ley de Newton ($a = F/M$) y aplicada a la masa de la Tierra ($g = M/F$) es considerada en los problemas de física general como una constante cuyo valor es 9.81 m/s^2 . Este valor puede sin embargo sufrir pequeñas variaciones, tan pequeñas que sólo se pueden medir en unidades del orden 10^{-5} g . Dichas variaciones son significativas en términos geológicos, hasta tal punto que su estudio, la gravimetría, constituye en la actualidad uno de los más importantes métodos de exploración minera y petrolera de investigación geológica básica.

El principio fundamental de la investigación gravimétrica consiste en calcular, para cada estación, el valor g ideal, según un método teórico, y compararlo con el valor obtenido por medición instrumental. Si alguna diferencia aparece, positiva o negativa, entre los dos valores, se hace entonces necesario replantear el modelo inicial en términos de exceso o ausencia de masa. Las diferencias entre g teórico y g real son llamadas anomalías de gravedad.

¿Cómo se puede calcular el valor g teórico? Gracias al modelo llamado aún en la actualidad Modelo de Bouguer, cuyos términos se pueden plasmar genéricamente en la ecuación:

$$g_{\text{teórico}} = g_{\text{lat}} - g_{\text{alt}} + g_{\text{Bouguer}} - g_{\text{topo}}$$

en el cual

$$g_{\text{lat}} = 978031.8 (1 + 0.005 \text{ Sen}^2 \phi - 0.0000058 \text{ Sen}^2 2 \phi)$$

$$g_{\text{alt}} = 0.3086 \cdot h$$

$$g_{\text{Bouguer}} = 0.0419 \cdot h \cdot \rho$$

$$g_{\text{Topo}} = \Delta_{\text{gr-}} + \Delta_{\text{gr+}}$$

donde:

ϕ latitud de la estación

h altura de la estación

ρ densidad de las rocas alrededor de la estación

$\Delta_{\text{gr+}}$ efecto producido por relieves positivos.

$\Delta_{\text{gr-}}$ efecto producido por relieves negativos

En resumen, según este modelo la gravedad en un punto cualquiera de la Tierra depende de su latitud, de su altura, de la capa de terreno que se encuentra entre la altura cero y la altura de la estación, y de la forma del relieve alrededor de la estación.

El llamado modelo de Bouguer en su forma moderna es el resultado de los adelantos que desde Bouguer hasta la actualidad se han venido sumando al conocimiento de la gravimetría. A pesar de su nombre, Bouguer no lo formuló de esa manera aunque sí planteó teóricamente cada uno de sus términos, de tal suerte que su paternidad sobre el modelo resulta indiscutible. Para entender cómo

llegó Bouguer a sus planteamientos hay que considerar algunos antecedentes a sus investigaciones.

Cuando Bouguer inicia sus trabajos, hacia 1736, ya se había comprendido que la gravedad varía con la latitud, en particular gracias a los trabajos de Cassini y sus discípulos. Cassini, después de hacer mediciones de g en las cercanías de París, envió a su alumno Jean Richer a hacer el mismo tipo de experimentos cerca de la línea ecuatorial, en Cayena más precisamente. Aunque el propósito de Cassini era demostrar que el radio ecuatorial era menor que el radio polar (propósito que obviamente no logró) sí observó, o por lo menos planteó, que existían variaciones en función de la latitud debido a la diferencia de los radios ecuatorial y polar. La otra causa de las variaciones de g con la latitud, a saber la influencia de la fuerza centrífuga de la rotación terrestre, ya había sido propuesta por Huygens. Bouguer hace análisis matemático detallado de la fórmula y sobre esta base presenta un cuadro de variación de g en términos de acortamiento de la longitud del péndulo en función de la latitud, utilizando la relación entre la gravedad y la longitud del péndulo cuando el período de este es constante.

La disminución de la gravedad con la altura era conocida en la época de Bouguer, puesto que se puede deducir de la ley de Newton.

$mg = K M m/d^2$ en el cual d es el radio de la Tierra.

Conocidos, o al menos planteados, los dos primeros términos de la variación de g , quedaban entonces en la época de Bouguer por formular los dos términos siguientes, los cuales en realidad no hacen más que resumir el efecto de la contribución de las masas montañosas y de sus irregularidades.

Una de las contribuciones importantes de Bouguer al modelo teórico de la gravedad es el planteamiento del tercer término de la ecuación general. Hasta entonces se había obtenido el valor de g en función de la latitud y de la altura de la estación, sin tener en cuenta la atracción de las masas situadas entre la estación y el nivel cero.

Bouguer observó que la disminución de g al pasar del nivel del mar (Guayaquil) a Quito no era tan grande como teóricamente se hubiera podido esperar y dedujo que algún factor debía hacer aumentar la gravedad. Concluyó que la capa de terreno comprendida entre las dos estaciones, Guayaquil y Quito, ejerce una atracción positiva que compensa parcialmente la disminución por la distancia. Bouguer dedujo que la atracción era ejercida por la capa concéntrica situada entre las dos estaciones, e hizo observaciones que le condujeron a interesantes conclusiones, principalmente que la densidad de la Tierra debe ser menor en la superficie que en el centro y que la variación debe ser progresiva. En los modelos actuales la capa situada entre el nivel cero y la altura de la estación es considerada como plana e infinita, y es llamada, en honor a Bouguer, la Meseta de Bouguer.

Sin duda alguna, la más notable contribución de Bouguer al conocimiento de la gravedad terrestre está en el descubrimiento de que las masas montañosas ejercen en sus cercanías atracción sobre la plomada, lo cual indica que de alguna manera influyen el valor de g . Es en el imponente volcán Chimborazo donde Bouguer va a realizar mediciones que le van a demostrar que la masa del volcán desvía la vertical determinada por la plomada.

Situándose en dos estaciones, al norte y al sur del Chimborazo, Bouguer pudo medir el ángulo de desviación. El ángulo formado por las dos verticales ideales es igual a la diferencia de la latitud entre las dos estaciones; el ángulo de las dos verticales desviadas es medible astronómicamente; con este método Bouguer midió la desviación de la plomada. El experimento de Bouguer fue confirmado en 1744 por Maskelyne en Escocia, estudiando la desviación producida por el monte Shehallian.

Consciente de la importancia de su descubrimiento, Bouguer se apresuró en hacerlo conocer. Prácticamente sobre el mismo terreno de operaciones, escribió una memoria titulada **Memoria sobre las atracciones y sobre la manera de observar si las montañas son capaces de producirlas**. Firmada en Riobamba el 30 de diciembre de 1738 (los trabajos en el Chimborazo se realizaron durante el mismo mes de diciembre), la Memoria fue enviada inmediatamente a París, y fue leída en la Academia de Ciencias en Octubre de 1739, es decir casi cinco años antes del regreso de Bouguer. Posteriormente fue incluida como capítulo IV La Figura de la Tierra.

La atracción de las masas montañosas es, en la formulación moderna del modelo de Bouguer, el último término de la ecuación y recibe el nombre

de Efecto de Relieve. Obviamente, el método de cálculo ha adquirido una gran precisión; sin embargo el planteamiento básico está claramente expresado en la Memoria de Bouguer.

De una manera general, los diversos términos del modelo conocido actualmente como el Modelo de Bouguer fueron formulados, o al menos planteados teóricamente por Bouguer. El trabajo de sus sucesores no consistió en otra cosa que en mejorar los métodos de cálculo. No se sabe sin embargo quién bautizó el modelo con el nombre de Bouguer, aunque ciertamente no fue el mismo Bouguer. Se supone que pudo ser el matemático Boscovich. Cualquiera que haya sido la evolución post Bouguer, y cualquiera que sea la evolución futura de un modelo siempre mejorable, hay que admitir que Pierre Bouguer legó a la Ciencia un planteamiento teórico que no solamente puede ser tomado como ejemplo de rigor científico, sino que por sus incidencias en varias ramas de las Ciencias, como la geodesia, la topografía, la geología, la prospección minera, y otras, debe ser considerado como un aporte mayor al progreso del conocimiento.

AGRADECIMIENTOS

Al ingresar a la Academia Colombiana de Ciencias deseo hacer un reconocimiento a las dos Instituciones que me han permitido desarrollar mi trabajo científico: mi Alma Mater, la Universidad de Ginebra (Suiza), y el Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras, INGEOMINAS, a quien dedico este honor.

Agradezco igualmente al personal de la Biblioteca Pública Universitaria, BPU, de Ginebra, por su colaboración en las búsqueda de documentos sobre Pierre Bouguer.