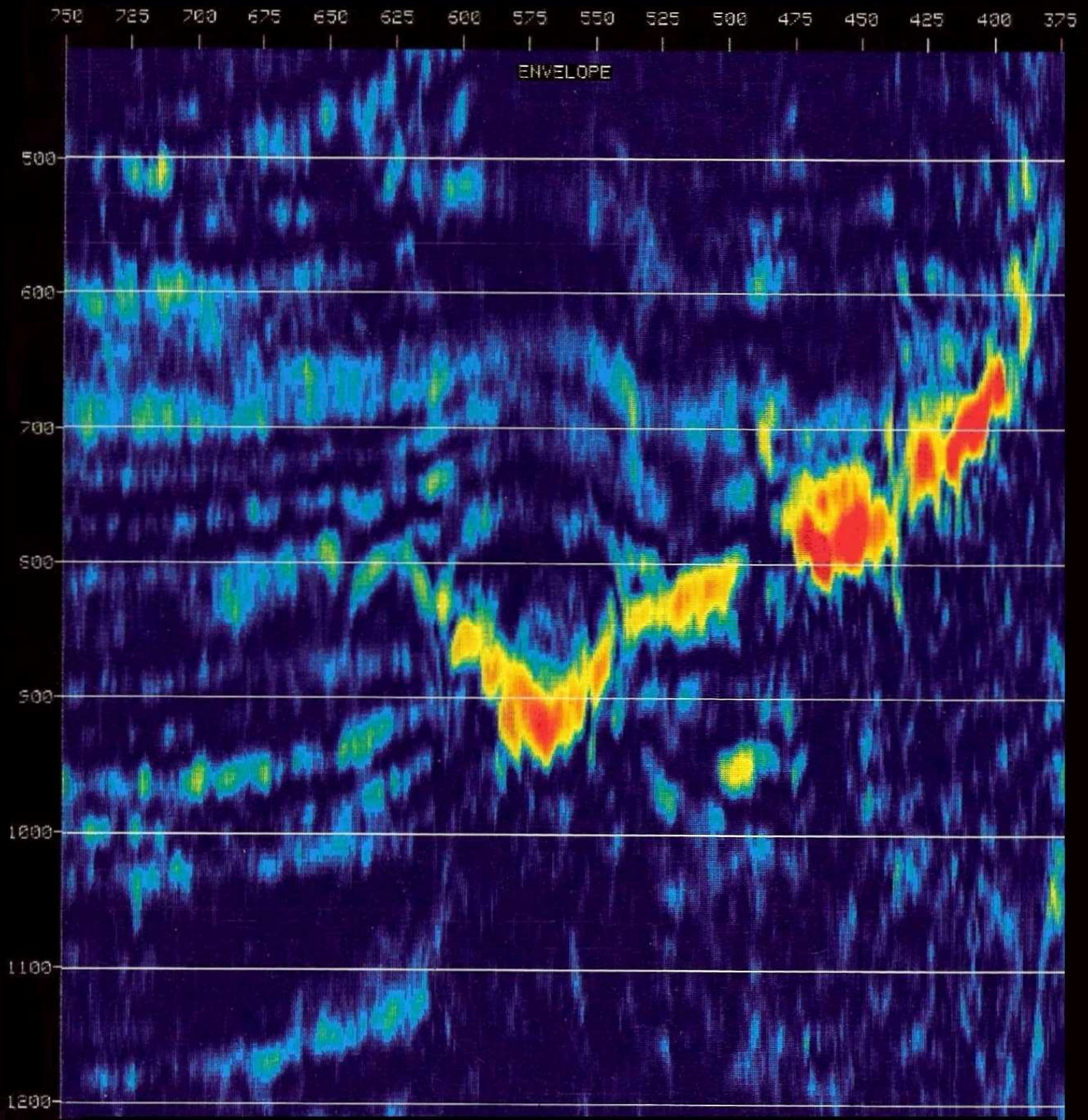


Chelotti, Luis

con la colaboración de: **Acosta, N., Foster, M.,
Ledesma Vallvè, M., Costantino, D.,
Cid de la Paz, M. & Guerra, G.**



**GLOSAS DE
GEOFÍSICA**

GEOFÍSICA GENERAL Y APLICADA, PRINCIPALMENTE HIDROCARBURÍFERA

Imagen de cubierta: sección sísmica con escala vertical exagerada en milisegundos. representada con el atributo de envolvente de las amplitudes, atravesando una intrusión ígnea básica discordante emplazada en secuencias terciarias de la cuenca Austral en el sudeste de Santa Cruz, Argentina (gentileza Yacimientos Petrolíferos Fiscales)

GLOSAS DE GEOFÍSICA

**GEOFÍSICA GENERAL Y APLICADA,
PRINCIPALMENTE HIDROCARBURÍFERA**

Luis Chelotti

con la colaboración de:

Néstor Acosta

Martín Foster

Mario Ledesma Vallvé

Diego Costantino

Marisú Cid de la Paz

Germán Guerra

Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina.

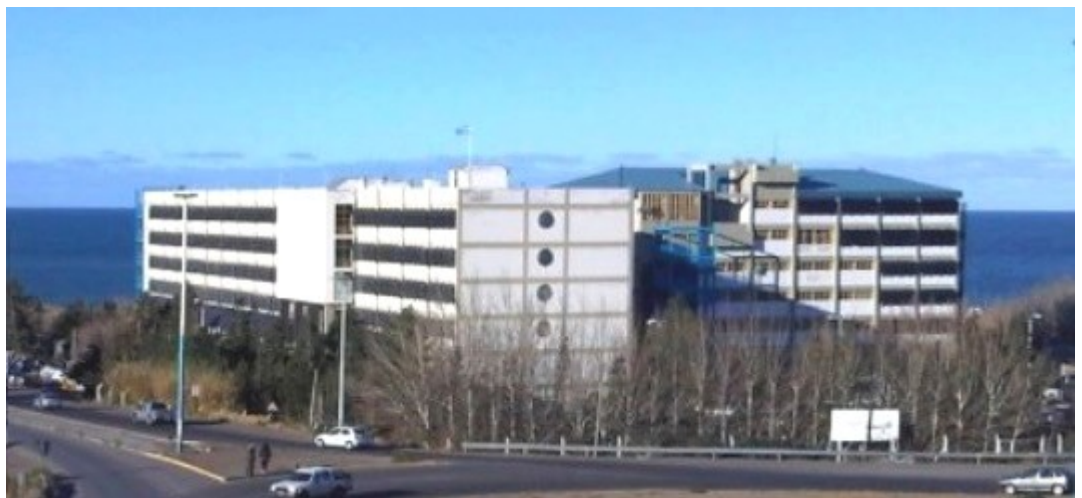
Glosas de geofísica / Luis Alberto Chelotti. - 1a ed. (mayo 2025) - Rada Tilly : Chelotti, Luis *et. alii*, 2025. Libro digital, PDF (492 p)

Archivo Digital: descarga
ISBN 978-631-01-0105-7

1. Geofísica. I. Título.
CDD 550.1

Queda hecho el depósito que previene la ley 11.723

John Blas Gutiérrez cursó geofísica con nosotros en 2012. Introvertido, aplicado, excelente ser humano. El 20 de enero de 2017, ya laureado y desempeñándose en YPF, su vida fue segada a los veintisiete años en el comercio de sus laboriosos padres inmigrantes en el barrio Moure de Comodoro Rivadavia, a causa de un irracional suceso delictivo, de esos que nos interpelan como sociedad. A la memoria de nuestro apreciado John dedicamos estos apuntes de los que supo estudiar. Y a nuestras madres y nuestros padres que nos moldearon con su ejemplo de honestidad y trabajo.



Sede Comodoro Rivadavia de la U.N.P.S.J.B. (foto de la página oficial de la Universidad)

Año 1979, clase teórica de Geología Histórica, aula en la Facultad de Ciencias Naturales y Museo de La Plata. Sobre la tarima el Profesor Doctor Alfredo José Cuerda explica con prisa y sin pausa mientras llena pizarrones a toda tiza. Cuando termina abajo a la derecha empieza a borrar frenéticamente arriba a la izquierda –¡de donde la mayoría de las manos, ya acalambradas, aun no han terminado de copiar!– y sigue desarrollando nuevos conceptos sin detenerse ni por un segundo... Hasta que por fin se da un respiro, gira hacia su concurrida clase, observa. Y pregunta enfático: –¿Están cansados Alumnos? –¡¡¡Sí Profesor!!! –respondemos todos a coro. –¿Quieren descansar Alumnos? –¡¡¡Sí Profesor, sí!!! –el coro a voz en cuello se ilusiona. Entonces el Profesor Cuerda hace el gesto de un ruego, abriendo las palmas a los lados, los ojos redondos hacia arriba: –¡Ah...! ¡Pero para descansar tienen toda la eternidad Alumnos! Y gira presuroso para continuar en su incansable, apasionado sacerdocio docente.

Estas glosas son el resultado de 20 años de docencia universitaria y de posgrado en geofísica, 8 en otras materias y 22 de labor aplicada en empresas, luego en buena medida volcada a la enseñanza. Más la imprescindible suma de conocimientos de un grupo de geofísicas y geofísicos acompañantes, también docentes y con gran experiencia en empresas. Pero en su mayor parte proceden de los saberes tomados de numerosos textos, publicaciones y cursos a cargo de geofísicos notablemente más autorizados que el suscripto, así como de empresas y universidades. Y naturalmente de los aportes resultantes de la interacción con otros colegas de las geociencias, la ingeniería y disciplinas afines, a la vez que de los propios alumnos de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco que han debido sufrirnos. Agradecemos a todas y todos por la contribución y/o estoicismo.

A través del tiempo hemos ido ampliando de modo no muy sistemático esta mirada de la geofísica aplicada, le hemos incorporado datos breves sobre otros mundos del entorno solar e incluso del Universo en su vastedad, así como alguna cuotita de humor y notas etimológicas, históricas, geográficas, etc.

El devenir social, político y económico siempre ha condicionado el avance de las ciencias, y las referencias aquí incluidas se respaldan en datos no siempre mostrados por el relato promovido por los emporios mediáticos que causalmente responden a los poderosos. En cualquier caso, sólo el burro que encabeza la lista es responsable de cierta visión progre, más afín a la solidaridad que al provecho económico sin límites. Así como, incluso en referencias marginales, las argumentaciones científicas –basadas en pruebas– son sostenidas por sobre las pseudocientíficas o la fe –sin por esto negar el valor histórico y emocional de la religión–. Y la misma responsabilidad aplica a la posible persistencia de errores técnicos que año tras año hemos ido corrigiendo, aunque seguramente no en su totalidad. Hay versiones preliminares de estos apuntes puestas a circular en la Red sin siquiera avisarnos y a veces borrando el nombre de sus autores, tal como ya mandaban hacer los faraones egipcios con las obras de sus predecesores, obvio que incomparablemente superiores a las inscripciones de estos acotados escribas geofísicos.

Cabe resaltar que las facultades de Ingeniería y de Ciencias Naturales y de la Salud, que nos han cobijado gentilmente en la U.N.P.S.J.B., ninguna responsabilidad tienen por referencias quizá opinables ni por los eventuales errores de estas glosas. Les cabe en cambio el mérito de haber facilitado nuestra labor docente y, en el caso de Naturales, de habernos permitido instalar un conjunto de computadoras a doble monitor para beneficio de los alumnos, una comprada por cada una de las Facultades, un par por el suscripto y otras varias donadas por YPF S.A. y Baker Hughes, a quienes somos muy gratos. Como también agradecemos a IHS por las licencias gratuitas de Kingdom Suite, igualmente a Geoactive por Interactive Petrophysics, en ambos casos provistas desde hace unas dos décadas, así como Ipi2Win y otras que se agregaron después. Fue el inicio de lo que hoy es la sala de informática en la que se han sumado aportes de otras cátedras.

El sesgo de estos apuntes es inocultablemente petrolero porque esa es la (de)formación nuestra y porque esta Universidad se alza en la geografía hidrocarbúrfica con epicentro en Comodoro Rivadavia. De lo que resulta un fortísimo acento sobre la prospección sísmica. Las referencias al importantísimo resguardo medioambiental no lavan las culpas que uno tiene por haber contribuido al calentamiento global y la sobrepoblación oceánica de plásticos, entre otros muy graves daños colaterales.

Los temas tienen un abordaje somero, simplificado y con poca matemática. La idea ha sido presentar cada uno con sus fundamentos, metodología general (adquisición, procesado, interpretación), referir las herramientas, incluyendo las últimas tecnologías (resonancia magnética, sísmica 4D y otras que siguen evolucionando cada día) y sobre todo explicitar con ejemplos las principales aplicaciones concretas, contenidos que sin embargo ya rebasan la carga horaria de esta asignatura en las facultades de Ciencias Naturales y de la Salud (carrera de Geología) e Ingeniería (carrera de Ingeniería en Petróleo). Quien requiera de abordajes robustos o específicos tendrá que recurrir a textos que nos superan ampliamente.

*Cátedra proviene del latín *cathedra*, sillón, más cómodo que las sillas de los alumnos en la antigua Roma, y muchas veces también que las de ahora: sólo por ser más viejo el profe ha ganado el privilegio de estar más cómodo, a sus anchas detrás del mostrador... Esta cátedra comenzó el siglo pasado a cargo de Pedro Lafourcade y Hernán Arroyo. También contribuyeron durante breve tiempo Raúl Violoni en las primeras épocas y Gustavo Petrelli más recientemente. Todos ellos dejaron su huella enriquecedora y además Pedro y Hernán nos facilitaron generosamente los textos y trabajos prácticos con los que se bastaban en aquellos años heroicos de labor sólo con tiza (del náhuatl, *tizatl*, yeso) sobre una pizarra (que ya no era de roca metamórfica...) y lápiz o birome, más las fotocopias como único apoyo tecnológico.*

Néstor Acosta, como alumno, fue el primero en llevar materiales a formatos digitales y su profesor de la teoría fue quien, por muy lejos, más tiempo dedicó a seguir esa feliz iniciativa, aunque el tema de resonancia magnética sigue siendo en su mayor parte autoría de Néstor y su aporte ha sido grande en la redacción de todos los temas de perfilaje de pozos (de los cuales es especialista) y en menor medida en otros.

Mario Ledesma Vallvè, Diego Costantino, Martín Foster, Marisú Cid de la Paz y Germán Guerra fueron haciendo sus valiosos aportes a este fondo común en su calidad de sucesivos integrantes de la cofradía; Mario principalmente en temas de geoelectrónica de superficie; Diego, Martín, Marisú y Germán sobre todo en temas de sísmica. Más, últimamente, Alejo Agüero Ferrer e Ivana Barría (también exalumna de este viejo profe). Y, sin un dibujante, hemos garabateado numerosas figuras y otras muchísimas han sido modificadas por el suscripto desde originales referidos al pie de cada una. Algunas provienen también de los programas informáticos empleados en las clases prácticas. Y las fotografías tienen las referencias de sus fuentes.

En fin, ha discurrido el tiempo y uno va cada vez más lento y encorvado con su creciente carga de almanaques sobre las espaldas... Cuando uno empezó a estudiar, la discusión no era sobre la forma precisa del geoide, sino sobre si la Tierra descansaba sobre tortugas, elefantes o ambos superpuestos... No ha sido fácil mantenerse actualizado. Afortunadamente, porque es señal de progreso científico y tecnológico.

Y –aclaración necesaria– gran parte de lo escrito en estas glosas no está en nuestras memorias internas sino en muchísimas externas: las fuentes citadas en cada tema, cantidad de libros físicos y tantísima data disponible en la world wide web. Por ejemplo en onepetro.org, wiki.seg.org, petro-pedia.com, wiki.aapg.org, wikipedia.org y numerosas otras páginas específicas de geociencias, así como de temas históricos, biológicos, etc. Nos agrada transmitir conocimientos variados y lo creemos provechoso, lo cual podría exponernos a ser considerados pedantes, pero obvio que estamos lejos de ser enciclopedias con patas.

Mención muy especial merece el Instituto Superior de Exploración Petrolera (ISEP) que durante el decenio de 1980 en Mendoza supo formar especialistas en ingeniería, geofísica y geología para la prospección de hidrocarburos. Exigente iniciativa de Yacimientos Petrolíferos Fiscales de la que fue principal impulsor Abel Burna y que tuvo protagonistas de relieve como Gonzalo Fernández, Luis Cabanillas, Pablo Boccaccio, César Fernández Garrasino y tantos más. Tiempos de una Argentina más virtuosa. Cinco de los docentes que hemos transitado por esta cátedra chubutense hicimos ahí el posgrado en geofísica y le debemos muchísima información que en parte ha sido volcada en las páginas que siguen.

*Glossa en latín significa palabra oscura, que requiere explicación –de ahí vienen también glosario, desglosar, etc.– y a su vez procede del griego γλῶττα (*glotta*, lengua) de donde políglota, glotis y demás. Esperamos que el resultado de estas no muy serias glosas sea mínimamente aceptable y útil.*

“Per aspera ad astra”

Luis Chelotti

INDICE TEMÁTICO GENERAL

(en función de los programas de grado)

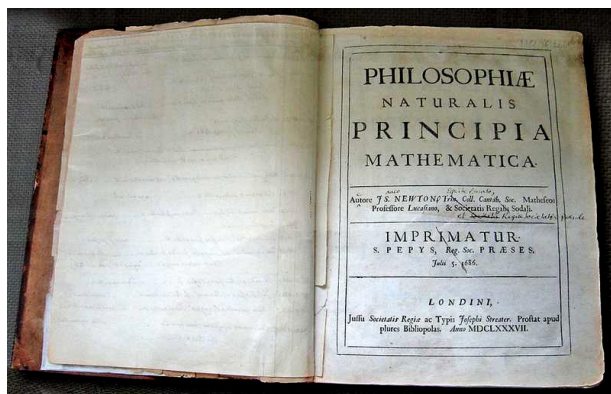
<i>anteprima</i>	página 9
Praeludium: Campos de Fuerza Física	página 11
Tema 01: La Ciencia Geofísica	página 17
El lote curvo y su vecindario – Envoltorios fluidos – Gestación y nacimiento de la geofísica – Ciencias afines – La anomalía – Utilización de los métodos geofísicos	
Tema 02: Prospección Gravimétrica	página 29
Conceptos básicos – Mareas terrestres – Cuestión de peso – Gravedad y relatividad – Adquisición de los datos – Procesamiento de la información (correcciones temporales y espaciales) – Interpretación gravimétrica (componentes regionales y residuales)	
Tema 03: Instrumental y Aplicaciones Gravimétricas	página 51
Mediciones de gravedad relativa (gravímetros y gradiómetros) – Mediciones de gravedad absoluta – Aplicaciones gravimétricas – Microgravimetría – Perfilaje de gravedad en pozos	
Tema 04: Prospección Magnetométrica	página 69
Atracción y repulsión – Comportamiento magnético de la materia – Componentes del campo – Magnetos planetarios – El dipolo geomagnético terrestre – Arqueo y paleomagnetismo – Adquisición de datos en prospección – Procesamiento magnetométrico – Interpretación (filtrados y modelados)	
Tema 05: Instrumental y Aplicaciones Magnetométricas	página 93
Magnetómetros para mediciones relativas – Magnetómetros para mediciones absolutas – Aparatos de laboratorio – Prospección aeromagnética – Aplicaciones de la magnetometría	
Magnetometría de Pozo	página 109
Principios físicos de la resonancia magnética nuclear – Herramientas de cable y de sarta de perforación – Pronósticos de fluidos realizados en base a la RMN – Otros registros magnéticos de pozos	
Tema 06: Prospección Geoeléctrica	página 123
Metodologías de prospección – Propiedades eléctricas de las rocas	
Métodos de Campo Natural	página 131
Corrientes telúricas y atmosféricas – Refucilos extraterrestres – Método de las corrientes telúricas – Métodos de las corrientes magnetotelúricas – Método del potencial espontáneo	
Tema 07: Métodos de Inyección de Corriente Eléctrica	página 149
Definiciones básicas – Adquisición de datos – Aparatos de campo – Dispositivos de prospección – Tipos de inyecciones y registros electródicos (mapeo de líneas equipotenciales, sondeo eléctrico vertical, calicatas eléctricas, tomografías eléctricas)	
Tema 08: Métodos Electromagnéticos	página 171
Fundamentos de la prospección electromagnética – Calicatas EM de emisor fijo – Calicatas EM de emisor y receptor móviles – Sondeos de frecuencias – Tomografías EM en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia – Registros hertzianos – Utilidad de los métodos EM	
Métodos de Polarización Inducida	página 193
Fundamentos de la PI – Prospección mediante PI (dominios del tiempo y de la frecuencia, PI espectral, otras variantes) – Métodos geoeléctricos y geoquímica	

- Tema 06-07-08(b): Geoelectrónica de Pozo y Saturación de Fluidos** página 203
Pozos de antaño – Perfiles del submundo– Potencial espontáneo – Mediciones de resistividad – Registros con corriente continua- Registros con corriente alterna – Cálculo de saturación de fluidos – Aplicaciones especiales – Tomografías entre pozos – Perfil dieléctrico – Pautas importantes
- Tema 09: Prospección Radiométrica** página 227
Procesos radiactivos – Dataciones – Tipos de radiaciones – Series radiactivas – Efectos de las radiaciones – Otros cuantos sucesos – Aparatos detectores – Unidades de conteo – Radiactividad de las rocas – Aplicaciones prospectivas – Radiometría y geoquímica – Utilización de isótopos radiactivos
Radiometría de Pozo y Mineralogía Espectrométrica página 249
Genética nuclear – Radiaciones subterráneas – Perfiles de rayos gamma naturales – Perfiles densimétricos – Perfiles neutrónicos – Otras aplicaciones – Evaluación mineralógica espectrométrica – Trazadores radiactivos entre pozos
- Tema 10: Prospección Geotérmica y Madurez de Hidrocarburos** página 267
Develando el infierno – Flujo térmico de la Tierra – Actividad volcánica – Causas del calor interno – Calenturas planetarias – Obtención del gradiente – Medición de la conductividad térmica – Cálculo del flujo calórico – Anomalías geotérmicas – Campo geotérmico – Otras aplicaciones – Modelado térmico y cinético de hidrocarburos
- Tema 11: Sismología y Estructura de la Geósfera** página 291
Zarandeo y zapateo – Magnitudes elásticas – Cuando la Pachamama se sacude – Leyes de tránsito de ondas – Factores que afectan la propagación elástica – Impedancia acústica, coeficientes y energías – Registro de los sismos – Análisis de sismos tectónicos – Tectónica de placas – Discontinuidades internas de la geósfera – Mundos temblorosos – Riesgo sísmico – Aplicaciones de la sismología
- Tema 12: Prospección Sísmica de Refracción** página 315
Adquisición y procesamiento en prospección (diversas complejidades) – Interpretación de las dromocronas (métodos, detalle, dromos verticales) – Aplicaciones – Técnicas modernas (ondas S, microtemblores, tomografías, 3D)
- Tema 13: Instrumental Sísmico, Seguridad y Medioambiente** página 337
Fuentes de energía (impulsivas en tierra firme y en mares y lagos, vibratorias, de ondas S) – Receptores (geófonos, hidrófonos) – Sismógrafo – Geografía del área a prospectar- Resguardo medioambiental – Seguridad y salud ocupacional
- Tema 14: Adquisición Sísmica de Reflexión** página 351
Conceptos básicos – Etapas en la adquisición – Parámetros de campo (de fuentes y receptores) – Sísmica 2D y 3D – Técnicas avanzadas
- Tema 15: Procesamiento Sísmico de Reflexión** página 367
Breve cronología – Fundamentos – Secuencia del proceso (recuperación de amplitudes, correlación cruzada, estáticas, deconvolución, dinámicas, migración, filtrados y otras) – Progresos recientes
- Tema 16: Prospección Acústica y Sísmica de Pozo** página 391
Acústica en mares y lagos – Perfiles sónicos de pozo (perfil convencional, imágenes, dipolar) – Sismograma sintético – Sísmica de pozo (prueba de velocidad, calibración del sónico, perfil sísmico vertical sin y con apartamientos, sísmica durante la perforación, ondas S, sísmica entre pozos)

Tema 17: Interpretación Sísmica de Reflexión	página 413
Conceptos básicos (interfaces, visualización, mapeo) – Resolución sísmica – Interpretación estructural – Engaños sísmicos (ruidos, variaciones de velocidad y otros) – Rastreo – Estructuras complejas – Cotejo con datos geoquímicos	
Interpretación Sismoestratigráfica	página 437
Conceptos fundamentales – Instrumentos y casos aplicados	
Tema 18: Procesos Sísmicos Especiales de Reflexión	página 451
Atributos de los sismogramas (amplitudes, frecuencias, descomposición espectral, traza compleja, velocidades) – Postprocesos sísmicos (inversión de trazas, modelado sísmico, cubo de coherencia, mapas de azimuth y buzamiento, regionales y residuales, métodos geoestadísticos, redes neurales, método AVO, interferometría) – Engaños, otra vez	
Registros Sísmicos Especiales de Reflexión	página 475
Adquisiciones especiales (ondas S, sísmica 4D, microsísmica, interferometría) – Sísmica de reflexión somera – Sísmica de reflexión ultraprofunda	
Coda: Reflexiones del Inframundo	página 491



(imagen earth.google.com)



Portada de Principia mathematica (foto Andrew Dunn)

“If I have seen further it is only by standing on the shoulders of Giants”

[“Si he visto más lejos es sólo por estar parado sobre los hombros de Gigantes”]

Isaac Newton (1675)

Muchos fueron los gigantes que permitieron auparse a Sir Isaac para poder ver más lejos desde la Royal Society de la capital británica. Y él lo admitió por escrito, pese a alguna soberbia y mal carácter. Aunque esa famosa frase en verdad no era de cuño propio: la pronunció antes que él, cerca de 1130, el filósofo francés **Bernard de Chartres**, en latín. Los planteos matemáticos del solterón Newton no surgieron únicamente como consecuencia del cálculo diferencial e integral que él mismo desarrolló durante sus dos años en la casa materna a causa de la pandemia de peste negra. (Cálculo pergeñado en paralelo con el alemán **Gottfried Leibniz**, cuyos fundamentos había cimentado la escuela india de **Mādhava de Sangamagrāma** en el siglo XIV en Kerala, a su vez con raíces en la matemática del gran **Aryabhata** del siglo V). Ni surgieron esos planteos espontáneamente de la manzana que **Isaac Newton** habría visto caer en el jardín de su madre, dejándolo pensativo. No; fueron en cambio el brillante corolario de una tarea de muchos cerebros de numerosas culturas a lo largo de tantísimas generaciones.



Trinity College, Cambridge (foto Rafa Esteve)



Templo de Kon Ombo cerca de Asuán (foto Gérard Ducher)

Entre esos grandes científicos que lo precedieron hubo uno que nació dos milenios antes, en el 276 a.C., muy lejos de la *Londinium* (hoy *London*, o Londres) que los romanos aún no habían fundado. Este gigante había sido niño en la ciudad griega de Cirene, que le dio el nombre de Cirenaica a la region nororiental de lo que hoy es Libia –donde en 2011 comenzó la revuelta que con interesado apoyo de la OTAN asesinó al dictador Khadafi, quien se negaba a permitir el saqueo extranjero de las riquezas hidrocarburíferas con las que daba bienestar a todo su pueblo y se aprovechaba (mucho) él mismo–.

Eratóstenes de Cirene creció, se embarcó por el Mediterráneo hacia el norte, perfeccionó sus estudios en Atenas, entabló amistad con **Arquímedes de Siracusa** (ciudad de la Magna Grecia, hoy Sicilia) y cuando tenía cerca de treinta años volvió a cruzar el mar, esta vez hacia Alejandría –a solicitud del rey griego Ptolomeo III Euergetes– para, una década después, llegar a ser director de la Gran Biblioteca, epicentro científico del mundo antiguo, además de inventar la esfera armilar para mostrar los movimientos astrales.

Numerosos fueron sus aportes a distintas disciplinas. Pero devino históricamente famoso sobre todo por haber calculado con un error relativamente chico el radio de la Tierra (asumiéndola esférica), así como la inclinación del eje terrestre y la distancia al Sol. Es ampliamente conocido que para ello se basó en la diferencia de sombra proyectada al mediodía del 21 de junio (solsticio de verano, día del año con el sol más vertical y más horas de

luz) cuando en los jardines de la Universidad de Alejandría (norte del actual Egipto) una vara vertical proyectaba una sombra de $7,2^\circ$ y en Syene (hoy llamada Asuán, a partir del arabizado *As Syene*) el ángulo era de casi 0° , los obeliscos no daban sombra y ese único día se iluminaba el agua del fondo de los pozos. Es que Syene dista sólo 41 km del paralelo imaginario que ahora conocemos como trópico de Cáncer, cuya latitud tiene el mismo valor angular que la inclinación del eje terrestre respecto al plano de la órbita en torno al Sol.

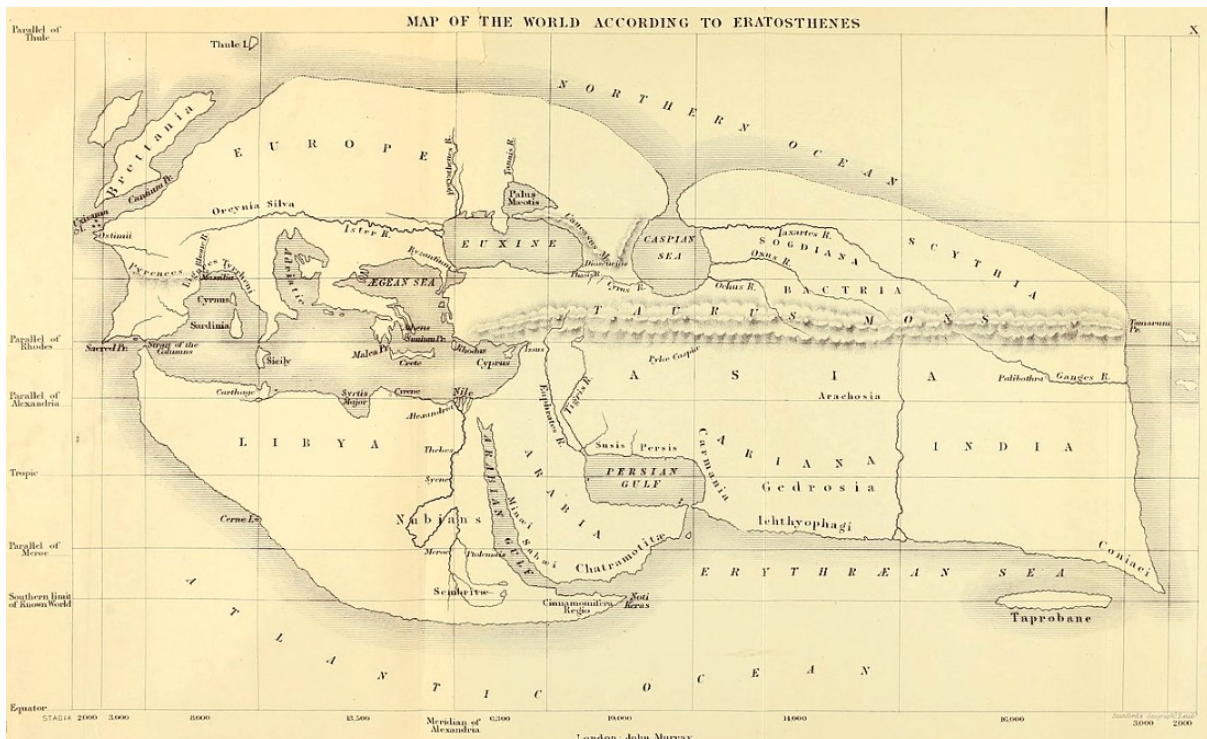


Nilómetro de Kon Ombo
(foto Daniel, Lasrutasdelviajero.com)



Concepto del cálculo hecho por Eratóstenes; ver texto
(gráfico de Magister Mathematicae)

Eratóstenes tomó la distancia referida por las caravanas entre las dos ciudades: unos 5.000 estadios en rumbo casi norte-sur. El largo de un estadio griego aproximaba 185 m, lo que resulta en unos 925 km en nuestro patrón actual, aunque el número exacto sabemos ahora que es de 843 km. Si $7,2^\circ$ se correspondían con 5.000 estadios, 360° daban una circunferencia de 250.000 estadios, o sea 46.250 km. Con toda nuestra tecnología y sabiendo que la Tierra es una esfera aplastada a lo largo de su eje de giro, hoy medimos 40.009 km pasando por los polos y 40.076 km alrededor del ecuador. El bueno de Eratóstenes no lo hizo nada mal (¡y los caravaneros tampoco!). A este hombre nacido en Cirene se lo considera el padre de la geodesia (la agrimensura planetaria). Fue alguien que sin saberlo le puso el hombro a Newton y que hizo esa primera mensura del lote curvo sobre el que dos milenios después se habría de edificar la ciencia geofísica.



Reconstrucción del mapa de Eratóstenes del mundo conocido en el 194 a.C. (Edward Burbury, 1883)



“
[“Tus rayos nutren a todo el país.
Su Vida prospera por tí,
pues Tú generas las estaciones
para manifestar la existencia
de toda tu creación.”]

Fragmento del Gran himno al Atón,
probablemente escrito bajo la dirección del faraón
Nefertiti (1360 a.C.)



Ocaso del Atón en Amarna, Egipto (foto Marc Gabolde)



Machu Picchu, Perú (foto C. Duncombe)

***“Pachamama llajtayoj
Upii, acullii sumaj mukhukhui
Kai jallpha sumaj kanampaj
Pachamama sumaj mama
¡Kusilla, kusilla!”***

[“Madre Tierra de estos lugares
Bebe, masca la coca y come a gusto esta ofrenda
Para que sea buena esta tierra
Madre Tierra buena madre
¡Sé propicia, sé propicia!”]

Invocación Quechua a la Pachamama
(ancestral)

Praeludium: CAMPOS DE FUERZA FÍSICA

El lunes 14 de septiembre de 2015 el golfo San Jorge amaneció ventoso, una vez más... Había gente laburando duro en equipos de perforación, terminación y reparación, había oficinistas con la mano más tiempo sobre el mate que sobre el ratón o el teclado, así como somnolientos estudiantes preparando exámenes finales. Y acaso

profes madrugadores pergeñando ásperas pruebas... Los medios informaban sobre la fuga de 147 presos talibanes en Afganistán (donde la guerra y la opresión a la mujeres siguieron desde que Bin Laden fuera empoderado por los yankees para expulsar a los soviéticos), sobre que al menos 34 desesperados migrantes (incluyendo niños y bebés) habían muerto ahogados en su intento de llegar a la isla griega de Farmakonisi (sumando unos 3.000 decesos cada año, aparte de unos 1000 muertos en los desiertos), sobre los aprestos de Bergoglio para viajar a ciudades cubanas y estadounidenses (Fidel había dicho en 1973 que "*Estados Unidos dialogará con Cuba cuando tenga un presidente negro y haya un papa latinoamericano*"), sobre los mendaces embates mediático-judiciales contra Dilma en Brasil (como contra casi todo presidente en todo país y época cuando se intenta un camino no subordinado a la avaricia de los máximos poderosos), sobre que en la ONU hacía un par de días se había votado limitar las alevosas prácticas usurarias de los fondos buitres (que tanta desdicha han provocado en muchos países), sobre que Esteban y Corina (padres de los nenes de 5 y 7 años fallecidos en el incendio de un semiesclavista taller textil del porteño barrio de Flores) se reunían con Gils Carbó en su reclamo por otra de tantas pequeñas República Cromañón. Que, como las denuncias por evasión y fuga de capitales, ninguna consecuencia judicial ni electoral traerían a los responsables políticos. O informaban sobre los clásicos del finde, entre ellos el Boca 1 River 0 con gol de Lodeiro.

Y había seguramente muchísimos otros ignotos "*acontecimientos en pleno desarrollo*" (según el yorugua Walter Martínez) protagonizados en esos días por los 7.400.000.000 de habitantes del orbe: desde bosques nativos (y sus aves y simios) siendo arrasados por topadoras sojeras, hasta personas viviendo momentos felices, dando a luz o dando la vida por el prójimo, o sufriendo discriminación, o simplemente durmiendo, o muriendo por causas naturales o en accidentes o víctimas de la perversidad de personas o gobiernos.

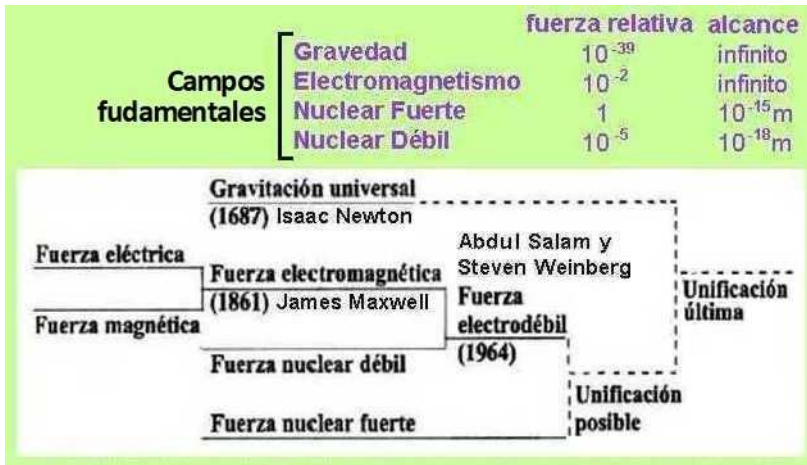
Y, entre todo lo que no supimos, hubo una noticia que recién fue publicada el 11 de febrero de 2016.

En los observatorios de Livingston (Louisiana) y Hanford (Washington, unos 3.000 km hacia el noroeste) a las 5:51 a.m. *East Time* (9:51 *Greenwich Meridian Time* ó 6:51 con el huso adelantado que emplea Argentina), fue simultáneamente registrado un evento que ocurrió hace nada menos que 1.300.000.000 de años. La tardanza de 5 meses en verificar e interpretar la información fue lo de menos. Porque incluso viajando a la velocidad de la luz las noticias demoran bastante en el inimaginablemente enorme espacio cósmico. Y en todo caso de nada hubiese servido que la data llegara al toque, porque en aquella lejana época por estos pagos del borde de la Vía Láctea sólo había microbios que no atajaban de estos temas.

La señal venía del violento abrazo de dos agujeros negros lanzados a la mitad de la velocidad de la luz en espiral convergente, cada uno con la masa de 30 soles metida en 150 km de diámetro, hasta fundirse liberando en una fracción de segundo una energía equivalente a 3 masas solares en forma de ondas gravitacionales, según la conocida expresión del alemán **Albert Einstein**: $E = m \cdot c^2$. Y esas ondas divergieron recorriendo el Universo para que finalmente una partecita llegara acá, con el equino exhausto, como ínfimas ondulaciones del tejido espaciotemporal. Fueron captadas en Livingston por el observatorio *LIGO* (*Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory*, el dispositivo óptico más grande y preciso del mundo con haces láser entre espejos cuya longitud exacta de 4 km N-S y otro tanto E-O se modifica al pasar una onda gravitacional, con una diferencia medible de ¡hasta una diezmilésima parte del diámetro de un núcleo atómico!). Y al mismo tiempo se captó en Hanford (dispositivo con la mitad de tamaño y sensibilidad), para tener el clásico e importantísimo *double checking* de la cultura anglosajona.

Antes se disponía de evidencias indirectas, como el decaimiento del periodo orbital observado en casos de púlsar binario (par de estrellas pulsantes). Y se había logrado detectar ondas gravitacionales primigenias midiendo un modo de polarización del fondo de microondas originado durante la inflación, fracciones de segundo tras la Gran Explosión o *Big Bang* que generó el Universo. (En los teles antiguos el 5% del ruido que entraba por la antena era ese fondo de microondas del inicio del espaciotiempo). Pero ahora la existencia de las ondas gravitacionales está confirmada tal cual lo planteó el gran genio de la física relativista.

El siguiente cuadro resume la fuerza relativa y el alcance de los cuatro campos de fuerza física del Universo. En el caso de la **gravedad** y el **electromagnetismo** (campos potenciales ambos) sabemos que la fuerza disminuye en relación inversa con el cuadrado de la distancia. Las **fuerzas nucleares fuerte y débil** sólo actúan a escala del núcleo atómico: la primera mantiene unidos a los **bariones** del núcleo (caso de los protones y neutrones, formados por tres quarks que se orbitan mutuamente) contrarrestando al electromagnetismo, y la segunda es responsable de fenómenos como la desintegración beta, que actúa sobre los **leptones** (electrones, positrones, neutrinos) y su alcance es mucho menor. Éste viene dado por el **principio de incertidumbre** hallado por el alemán **Werner Heisenberg** que determina la vida estadística de partículas subatómicas tales como las mediadoras de estos campos: cuanto menos viven, menos lejos pueden llegar.



Esquema general de la teoría del campo unificado.

Las palabras fermión y bosón honran respectivamente al italiano **Enrico Fermi** y al indio **Satyendra Bose**, quienes mucho han contribuido con sus investigaciones. Además, a partir de las estadísticas de Fermi-Dirac (a las cuales contribuyó el inglés **Paul Dirac**) y de Bose-Einstein, estudiando después el comportamiento de los fermiones y bosones bajo una rotación de 360° , el estadounidense **Richard Feynman** planteó que los grupos de partículas con momento angular ínterinco (espín) de magnitud $\frac{1}{2}$ "repelen" y los de espín entero "agrupan". Después se comprobó

que las tres generaciones de **fermiones** que forman la materia (quarks y leptones, con estados cuánticos asimétricos y espín fraccionario) tienen sus correspondientes antipartículas de carga opuesta: las de **antimateria**.

Asímismo se conocen partículas mediadoras, los **bosones** (cuánticamente simétricos, de espín entero): los fotones (que median en el campo electromagnético), los gluones (del campo nuclear fuerte) y los Z y W (que lo hacen en el nuclear débil, únicos bosones masivos), todos vectoriales, portadores de la fuerza. Más el bosón escalar predicho por el escocés **Peter Higgs** al hacerse la unificación conceptual del electromagnetismo y la fuerza nuclear débil (y comprobado en 2012 en el gran colisionador del *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*), que permea todo para explicar el origen de la masa en las partículas elementales. También se hipotetiza la existencia de las partículas mediadoras del campo de gravedad (gravitones), aunque con dificultades teóricas.

Tras la unificación de los campos de las fuerzas electromagnética y nuclear débil en una **fuerza electrodébil** (por obra del paquistaní **Abdul Salam** y del estadounidense **Steven Weinberg** en 1964), muchos físicos han estado trabajando para hallar el vínculo entre éstas y la nuclear fuerte y, objetivo más complejo aún, el vínculo con la gravedad para unificar en una sola gran teoría toda la física del Universo. Se interpreta que todas las fuerzas son expresiones de una única fuerza indiferenciada hace $13,8 \cdot 10^9$ años, al momento de ocurrir el *Big Bang*, nombre paradójico dado por el inglés **Fred Hoyle**, porque ocurrió antes de poderse definir qué es grande o pequeño y porque no explotó afuera de sí mismo, sino que se expandió exponencialmente en la etapa inicial de inflación. Fue la génesis del espacio, el tiempo y la entropía, siempre crecientes. El modelo plantea la posible existencia inicial de una suerte de burbuja fluctuante de vacío físico (estado comprobado a nivel cuántico). Suerte de valija híper apretada, ordenadísima, que se disparó haciendo gran desparramo, como la caja de Pandora...

El primer cálculo de la expansión universal surgió de la observación del estiramiento de las longitudes de onda (corriéndose más hacia el rojo) de la luz que nos llega de galaxias cada vez más distantes. Análogo al sonido de un motor que se oye agudo cuando se acerca y tanto más grave cuanto más rápido se aleja, efecto que fuera descubierto por el austríaco **Christian Doppler** en 1845. Este desplazamiento espectral indica que las galaxias más distantes se nos alejan más rápido, y el actual modelo de expansión universal, así como el concepto del inicio a partir de un gran estallido, fueron propuestos por el sacerdote belga **Georges Lemaître** en 1927. Pero quien tomó su idea, rehízo los cálculos con mayor detalle, los publicó en 1929 y se quedó con la gloria (incluso izada en un telescopio espacial) fue el estadounidense **Edwin Hubble**. La expresión es: $v = Ho \cdot d$

(v es la velocidad recesional o de alejamiento, d la distancia al astro considerado y Ho la constante de Hubble: 71 ± 4 km/s/Mpc; donde 1 Megaparsec representa $3,26 \cdot 10^6$ años luz)

		Fermiones:					
		I	II	III			
masa →		3 MeV	1.24 GeV	172.5 GeV	0	126 GeV	
carga →		$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0	
spin →		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0	
nombre →		u up	c charm	t top	Y photon	H bosón Higgs	
	Quarks	6 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g gluon		
	Leptones	<2 eV 0 $\frac{1}{2}$ V _e electron neutrino	<0.19 MeV 0 $\frac{1}{2}$ V _μ muon neutrino	<18.2 MeV 0 $\frac{1}{2}$ V _T tau neutrino	90.2 GeV 0 1 Z fuerza débil		Bosones mediadores
		0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e electron	106 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	1.78 GeV -1 $\frac{1}{2}$ T tau	80.4 GeV ±1 1 W fuerza débil		

Fermiones y bosones (gráfico de Edgargaza)

Al comienzo el Universo habría sido como un gas a unos 10^{32} °C y densidad extrema. Aproximadamente un centésimo de segundo después se habrían formado los protones, electrones y otras partículas a unos 10^{11} °C mientras los fotones chocaban entre sí haciéndolo opaco. La expansión debida a la inflación hizo bajar la temperatura hasta $3 \cdot 10^3$ °C en torno a los 380.000 años, disminuyó la frecuencia de la energía y empezaron a formarse átomos que no interactuaban con los fotones. Estos últimos viajaban en todas direcciones, con fluctuaciones, y el Universo se hizo transparente. De ese tiempo procede la radiación cósmica de fondo de microondas que en 1964 el alemán **Arno Penzias** y el estadounidense **Robert Wilson** detectaron en New Jersey con un receptor en los laboratorios Bell, lo que les permitió ganar el Nobel de física. La expansión causó el alargamiento de la longitud de onda de la radiación de fondo e hizo bajar la temperatura del Universo hasta los actuales 2,7°K (-270,4°C), abismalmente inferior a la que alcanzó instantes después de su nacimiento cuando la inflación cósmica (causada por algún campo no conocido) produjo esa tremenda expansión y elevó las fluctuaciones subatómicas a escalas astrofísicas, proporcionando así las semillas para la formación de galaxias. Vivimos en un Universo cuya topología parece ser plana o euclidiana (la geometría que debemos a **Euclides de Alejandría** en torno al 300 a.C.), es decir no esférico o cerrado, ni hiperbólico o abierto. De él nos es posible ver hasta a un radio de $46,5 \cdot 10^9$ años luz, lo cual no es más que una pequeña parte del total porque la inflación y la continuidad expansiva posterior llevaron el resto más allá de toda posibilidad técnica: ni su luz ni alguna otra radiación podrá jamás llegar a nosotros. Pero si la pregunta es ¿dónde ocurrió el *Big Bang*?, la respuesta es simple: ¡acá!, y en todo otro punto del Universo.

El **modelo estándar** largamente aceptado es un marco teórico cuántico de campos que conlleva la adopción de una **teoría de campo de recalibración** (*gauge*) que permite efectuar rotaciones o transformaciones de simetría de una región sin afectar al resto y sin alterar las propiedades físicas observables. O sea que el lagrangiano que describe el campo es invariante cuando un grupo de Lie (variedad diferenciable cuyas operaciones de grupo son funciones analíticas) es aplicado sobre sus componentes. (El lagrangiano es una función escalar que permite obtener la evolución temporal, las leyes de conservación y otras propiedades de un sistema físico dinámico y fue ideado en 1788 por el matemático italo-francés **Giuseppe Lagrange**). Este modelo, si bien bastante probado, aún no es capaz de predecir el valor de algunas constantes básicas de la materia, no logra describir satisfactoriamente la relación entre la gravedad y las otras fuerzas, no explica de modo convincente que el Universo tenga muchísima más materia que antimateria, ni que el sentido de giro predominante sea antihorario.

A nivel cosmológico fue fundamental el aporte hecho por **Albert Einstein** con sus teorías de la **relatividad especial y general** de 1905 y 1915, respectivamente, de las que surge que las leyes físicas son idénticas en todos los sistemas de referencia, no existiendo un sistema privilegiado. También surge que la velocidad de la luz (*c*) es una constante universal, así como resulta que aceleración y gravedad son distintas manifestaciones de un mismo fenómeno, y se establece el concepto de curvatura espaciotemporal creado por cada masa y la influencia recíproca entre ellas. Pero, a su vez, una masa se mueve según la curvatura del espaciotiempo, es decir que dicha curvatura se va modificando al interactuar con las masas en movimiento según la geometría propuesta por el alemán **Georg Bernhard Riemann**. De esto resulta que la gravedad en rigor no es una fuerza, aunque se la asuma así por practicidad al ser una interacción física comparable a otras. Y se están buscando los hipotéticos gravitones que podrían ser los transmisores de la información en un presunto modelo de gravedad cuántica.

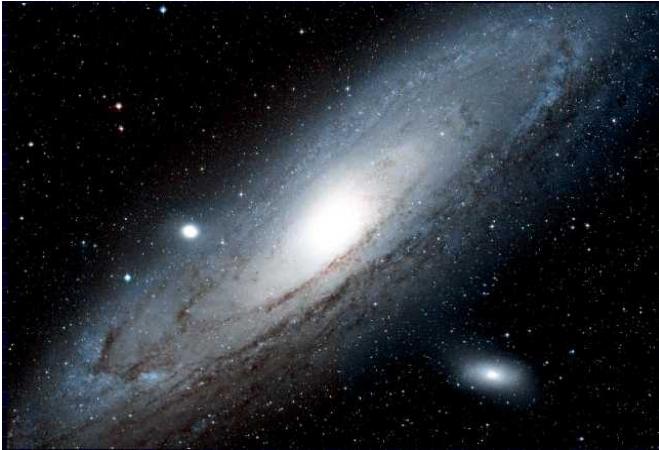
Recordemos de paso, a nivel atómico, que un protón o un neutrón tienen unas 2.000 veces más masa que un electrón, si bien los 3 quarks que los componen tienen muy diferente masa entre ellos –ver en la figura precedente los valores en MeV– y recordemos que, por ejemplo en un hidrógeno, el radio del átomo es unas 100.000 veces mayor que el radio del protón y que ese radio surge en base a la distancia media probabilística a la que se hallará el electrón –de espín “arriba” o “abajo”– en el orbital según su función de onda.

Universo viene del latín *universus* (uno-vertido, girado, el punto donde todo se une y gira, esa totalidad que es abordada en una universidad). El Universo tiene “huecos” y regiones densas conectadas por filamentos y cuenta unos 2 billones de galaxias (del griego *γαλαξίας*, galaxías, que significa láctea), por caso la Vía Láctea, nuestra propia galaxia, el camino de leche que en la mitología grecorromana provocó Hera (Juno), la esposa de Zeus (Júpiter) al retirar bruscamente de su pecho a Heracles (Hércules), el hijo bastardo que amamantaba.

Sólo una pequeña fracción son galaxias grandes, resultantes de la unión de otras más chicas. Según su tamaño las galaxias pueden contener entre 10^7 y 10^{14} estrellas (más nebulosas, planetas, cometas, etc.). Ahora bien, si hay tremenda bocha de galaxias, podríamos preguntarnos por qué el cielo no es más brillante. Bueno, además de la presencia de nubes de polvo galáctico y el corrimiento al infrarrojo no visible de una parte de la luz de galaxias muy lejanas, en lo esencial el cielo negro es prueba del *Big Bang*, existe muchísimo más espacio vacío, con los conglomerados estelares cada vez más separados y sus luces que demoran en venir desde cada vez más

lejos a medida que avanzan el tiempo y la expansión universal.

Falta aún conocer la naturaleza de la posible **materia oscura**, que se asume constituida por partículas lentas, sin carga eléctrica y con interacciones imperceptibles con la materia ordinaria, sólo detectable por sus efectos gravitacionales. Sería una red tridimensional que evitaría que toda galaxia se desparrame mal, ¡y representaría el 85% del total de la materia cósmica! (Se la está intentando registrar en minas profundas con detectores de gas xenón, pero todavía nada). Y también falta entender cómo funciona la **energía oscura** que está acelerando la



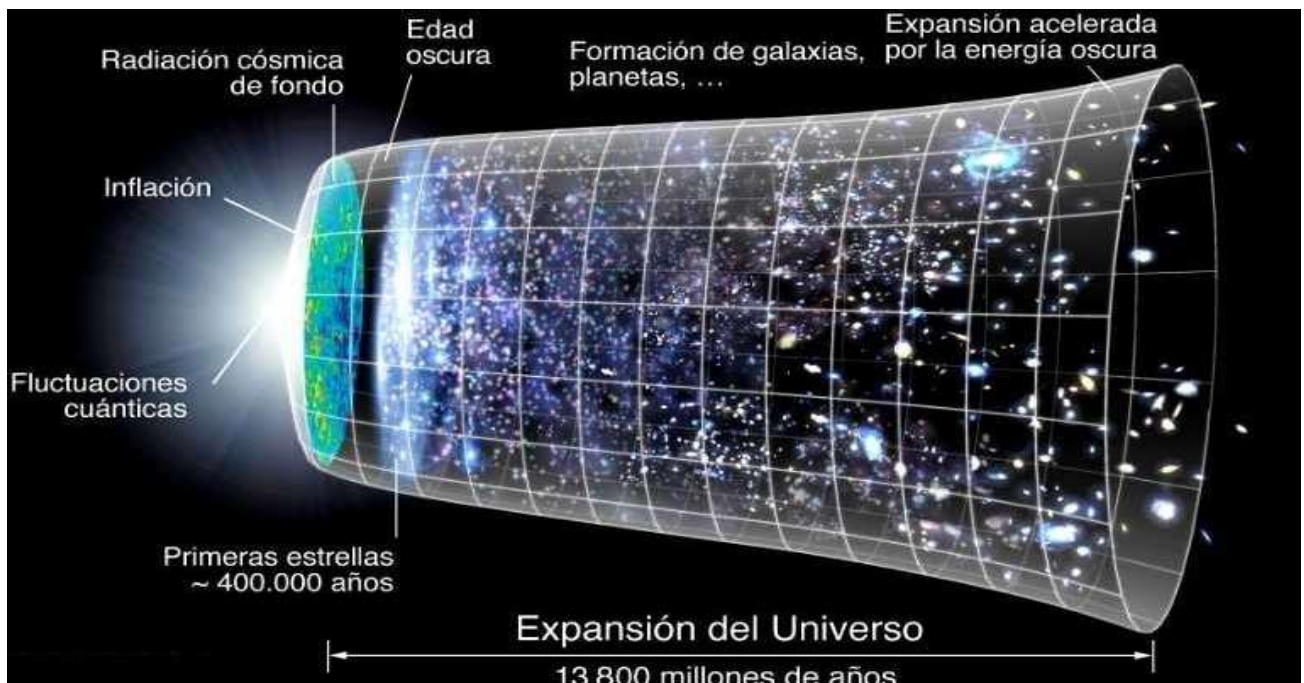
Galaxias Andrómeda, M32 y M110 (imagen Boris Štromar)

expansión del Universo, separando cada grupo de galaxias de los demás. Esa energía o constante de expansión cosmológica Λ ¡es 2,2 veces más potente que la suma de las materias ordinaria y oscura! Se la interpreta como la energía del vacío cuántico. Pero podría no existir y la aceleración tener otra causa.

Más medularmente pero sin pruebas, se postula la **teoría de cuerdas** para explicar toda la materia y energía como cuerdas vibratorias: según cómo vibre una cuerda sería un electrón, un quark u otra partícula (lo que haría de la naturaleza una suerte de música cósmica)... Esto en un esquema de muchas dimensiones (9 espaciales, la dimensión tiempo y otra que las englobaría formando membranas) con un modelo de supersimetría a fin de abarcar unificada y

coherentemente todos los conceptos físicos fundamentales. También se hipotetiza la existencia de multiversos y otras ideas hasta ahora sólo especulativas, entre ellas la conjetura holográfica del argentino **Juan Maldacena**.

Mundo viene del latín *mundus* (limpio, ordenado; de dónde lo contrario es *inmundus*) y cosmos del griego *κόσμος* (kósmos, que también significa orden; por lo cual cosmética es ordenar, embellecer).



Esquema de evolución cósmica, fuera de escalas (gráfico de la NASA/WMAP Science Team)

Hasta aquí este brevísimo *racconto* sobre las fuerzas fundamentales que protagonizan el múltiple juego de la física universal, incluyendo naturalmente todo cuanto ocurre en la Tierra y confluyendo a distintas escalas para dar como resultado esas curiosas geometrías bellamente repetidas, los fractales (del latín *frangere*, quebrar, como infringir y refracción). La topología no cambia para los sistemas dinámicos determinísticos ya que incluso en sus expresiones caóticas existe orden dentro del desorden pese a su apariencia aleatoria.

Ahora bien, en lo que a nosotros atañe, la geofísica se las arregla bien jugando con la física clásica y las cuatro fuerzas principales combinando sus tañidos cual campanas disjuntas. De hecho en algunos métodos estudiamos

magnetismo y electricidad como si fueran fenómenos separados (obviando la unicidad descubierta por el escocés **James Maxwell** en 1861) o analizamos las perturbaciones sísmicas de manera apartada de la gravedad, a la cual en última instancia remite, o la radioactividad sin reparar en las fuerzas electromagnética y nuclear débil, y la geotermia sin analizar que en esencia se trata de energía cinética vinculada con los fenómenos electromagnéticos y gravitatorios.

Vivimos en la aldea planetaria del Sol, en un brazo espiral en los arrabales de la Vía Láctea. Ésta, junto a otras galaxias como Andrómeda y las Nubes de Magallanes (así llamadas porque fueron descubiertas durante esa expedición), constituyen la unión gravitacional del Grupo Local. La nebulosa solar hace unos 4.600 millones de años (m.a.) formó un disco en torno al gran astro central y en ella se formaron los núcleos de los planetas. Cuatro grandes gaseosos más afuera (Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno) y cuatro pequeños rocosos más adentro (Mercurio, Venus, Tierra, Marte) porque el Sol succionó la mayor parte de la materia cercana y su viento de partículas les impidió retener atmósferas muy espesas. El giro era y es antihorario, salvo Venus y Urano que fueron alterados por duras colisiones en sus primeros tiempos; este último incluso quedó como *spiedo* tumbado. Los modelos indican que se formaron decenas de planetas y, con tanto tráfico, se dieron fuertes piñas. Muchos terminaron desintegrados o expulsados o absorbidos o capturados como satélites, principalmente por los más grandotes, Júpiter y Saturno. Parece que Neptuno y Urano estaban en ese orden y más cerca de los dos mayores, y la resonancia orbital gravitacional con ellos los hizo alejar hace unos 4.000 m.a. En el caso de Neptuno mandándolo más lejos, haciendo enroque con Urano, hasta meter parte de su órbita en el distante cinturón de Kuiper, donde armó tremendo desparramo de cometas. Muchos de esos pequeños astros se precipitaron hacia el sistema Solar interno causando un bombardeo todavía visible: los cráteres de Marte, Mercurio y muchas lunas. En la Tierra fueron borrados por la tectónica de placas y la erosión. En Venus quedan unos 900 bajo su densa atmósfera. Los cuatro grandes planetas, mayormente gaseosos, simplemente engulleron esos cometas, al igual que asteroides y planetas primigenios. Muy lejos, rodeando todo el sistema, quedó la esférica nube de Oort.

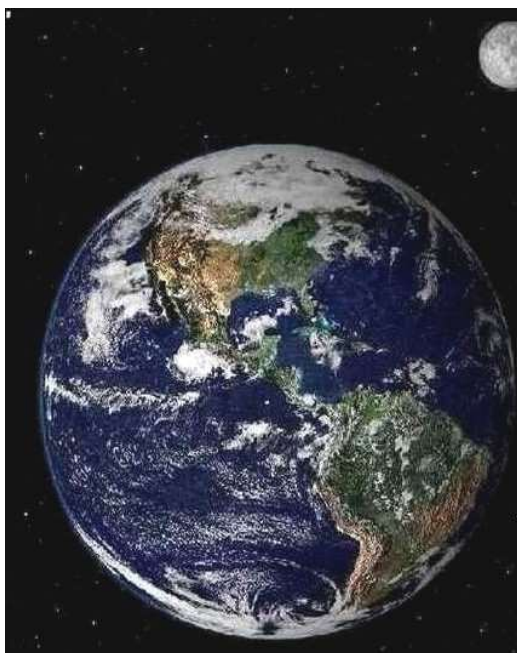
La edad de nuestro planeta se estima en 4.540 m.a. Una colisión *grossa* parece tuvo la joven Tierra unos 30 m.a. después de su formación. Se dieron mal con otro planeta menor que se situaba en la misma órbita. Según esta teoría bastante probada, del impacto surgió el material que formó la Luna, parte fue absorbido por la Tierra y parte se dispersó. A ese planeta destruido se lo llamó Teia porque en la mitología griega es la madre de Selene. Y, en medio de todo ese caos, la vida ya surgía en este mundo. Los genetistas afirman que nuestro antepasado común acelular vivió hace alrededor de 4.200 millones de años y lo bautizaron *LUCA* (*Last Universal Common Ancestor*). *Last* porque se presume que antes hubo otras variantes de ácidos nucleicos libres que no dejaron descendencia, todos derivados de un supuesto *FUCA* (*First Universal Common Ancestor*), cuyos hábitats probables habrían sido charcas vinculadas a fuentes hidrotermales.

En fin, tras este preembarque vayamos al abordaje de la geofísica. Asignatura viene del latín *assignare* (señalar hacia) y nosotros señalaremos hacia nuestro mundo y la búsqueda de sus recursos minerales. La propuesta es navegarlo virtualmente gracias al impulso de favorables fuerzas físicas. Desde el espacio, a través del aire, por el agua y sumergiéndonos en el interior sólido del planeta que habitamos.

Intentaremos no chocar la calesita.



UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), dron geofísico (foto D'Alessandro *et al.*, 2015)



La Tierra tiene unas mareas gravitacionales fuertes provocadas por su cercano satélite natural, el más grande del sistema Solar con relación al tamaño del planeta, tiene unos flujos radiactivo y térmico significativos, y un gran núcleo de hierro, en buena parte líquido, que con la rotación planetaria origina un fuerte campo magnético. Tiene también corrientes eléctricas en su atmósfera e interior, así como masas convectivas en sus capas fluidas y sólidas, tiene placas corticales móviles, sismicidad y vulcanismo, mucha agua líquida en su superficie, rocas graníticas, vida, y una importante atmósfera de nitrógeno que unos verdes seres fotosintetizadores contaminaron de oxígeno. Además pululan sobre la Tierra unos bichos (a veces) inteligentes, prepotentes, que tratan de entender la naturaleza de su mundo y de maximizar la explotación de sus recursos, con daño crecientemente grave de la biodiversidad. De varios de estos temas trata la Geofísica.

“Lasciate ogne speranza, voi ch’entrate”

[“Dejad toda esperanza, vosotros que entráis”]

LA DIVINA COMEDIA, Inferno.

Dante Alighieri (circa 1310)

LA CIENCIA GEOFÍSICA

Ciencia viene del latín *scientia*, conocimiento. Geofísica, del griego *γῆ* (geo), Tierra, y *φυσικός* (physikos), natural –y natural viene del latín *natura* y ésta de *nasci*, nacer–. La geofísica es la ciencia que estudia los campos físicos vinculados a nuestro planeta (desde el centro hasta el límite exterior de la magnetósfera). Es decir que estudia la Tierra mediante métodos de la física, de investigación indirecta, a fin de conocer su evolución y características actuales (**geofísica pura**), e incluso inferir su futuro, y también como herramienta de prospección de recursos (**geofísica aplicada**). Pueden medirse los campos físicos naturales (gravedad, magnetismo, radiactividad, geotermas, etc.) o generarse campos artificiales por emisión de electricidad, energía sísmica y otros, para así obtener mediciones más efectivas a los fines exploratorios. En estos casos viene en nuestro auxilio la ingeniería, del latín *ingenium*, máquina o engendrar. Gen procede de *γενος* (génos), parir.

EL LOTE CURVO Y SU VECINDARIO

Sobre un lote curvo las distancias más cortas son curvas y se llaman **geodésicas**. Y el sitio más alejado está bajo nuestros pies y se llama **antípodas** (pies opuestos). Respecto al golfo San Jorge en Mongolia. Y fue el griego **Hiparco de Nicea** hacia el 250 a.C. el primero en proponer meridianos y paralelos.

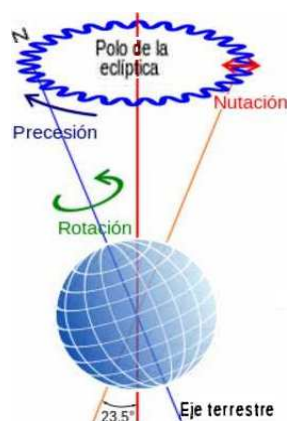
Ya mencionamos el achatamiento polar de la Tierra –análogo al de otros planetas, lunas y soles– aproximado esferoide oblató (porque prolato sería como pelota de rugby), mejor definido como **elipsoide de revolución** (elipse puesta a girar), aunque tiene suaves abolladuras y eso se aborda en el Tema 02. Su semieje menor (el de rotación) mide 6.356,752 km y el mayor (contenido en el plano ecuatorial) se estira hasta 6.378,137 según el *World Geodetic System* de 1984, refinado periódicamente. También sabemos que el **eje de rotación** está chingado respecto al **plano de la eclíptica** (plano de los eclipses o plano orbital alrededor del Sol) en 23,4°, valor que cambia en un ciclo de 41.000 años desde 21,5 hasta 24,5° por causas astronómicas y es afectado por vibraciones provocadas por los grandes sismos –el terremoto y tsunami de Indonesia en 2004 lo corrió 17,8 cm–. Además el eje cabecea como trompo (**precesión**, debido al momento de fuerza del Sol sobre una Tierra no esférica) en un ciclo de unos 25.800 años. Por añadidura hay otro movimiento precesional menor (la **nutación**, por efecto gravitacional combinado lunisolar) que hace cabecear el eje sólo 9” de arco cada 18,6 años. Y encima un bamboleo muy pequeño (descubierto por el estadounidense **Seth Chandler** en 1891) de 0,7” cada 433 días. O sea que describimos varios rulos superpuestos. Incluyendo, obvio, la rotación diaria.

El mundo da una vuelta completa sobre sí mismo en 23 hs, 56 minutos y 4 segundos (**día sidéreo**), pero como en ese lapso avanza en la órbita, debe girar un toquécito más para dar de nuevo la misma cara al Sol y redondear así las 24 hs (**día solar**). Algo similar pasa con la Luna (que tiene 1/4 del radio terrestre y 1/81 de su masa), ya que rota sobre su eje en 27,3 días y se traslada elípticamente alrededor de la Tierra ¡en justo el mismo tiempo!, mostrándonos por tanto siempre la misma cara a una distancia media de 384.400 km. Pero, considerada respecto a la órbita solar, su rotación demora 29,5 días. Las **fases de la Luna** obedecen a la diferencia de posición diaria resultante del día de 24 hs y la traslación lunar de casi 28 jornadas, motivo por el cual las mareas (debidas principalmente a la atracción gravitatoria lunar) se retrasan unos 50 minutos cada día (24 hs / 28 ≈ 50 minutos). Todos sabemos que las fases son convencionalmente cuatro, dando origen al concepto de semana, del latín *septimana*, conjunto de 7 días utilizado desde tiempos arcanos de la humanidad.

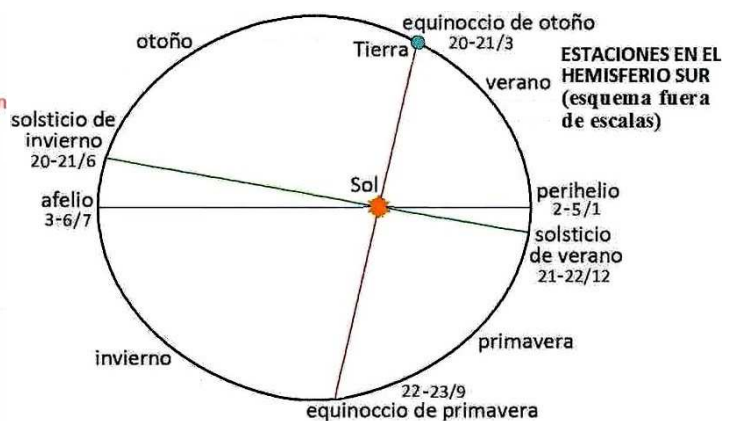
Ahora bien, la forma de la imaginaria elipse terrestre en torno al Sol (con la Luna alrededor) se achata y redondea (variación de la **elipticidad**) en ciclos de unos 100.000 años por efecto de la posición relativa de los demás planetas (siendo Júpiter el más influyente), ciclos que también hacen fluctuar la inclinación de ese plano elíptico. Avanzando 30 km cada segundo, la demora en dar la vuelta al Sol es de 365 días, 5 hs, 48 minutos y 46 segundos y por eso cada cuatro años hay que agregar un día más y se llama bisiesto: de *bis sextum diem ante kalendas martius* (duplicar el sexto día antes del primero de marzo), porque en el antiguo calendario romano se repetía el 24 de febrero, que era un mes que normalmente tenía 29 días y pasaba a tener 30. Pero luego perdió uno que pasó al final de agosto para que el mes en homenaje a Octavio Augusto fuera idéntico al de Julio César, ambos con 31 jornadas, y además en el 153 se pasó de empezar el año el 1° de marzo a iniciarlo el 1° de enero (*januarius*, en honor al dios Jano) y por eso *september* dejó de ser el séptimo mes y así siguiendo.

Las cuatro **estaciones** son otra convención práctica que viene desde las antiguas civilizaciones. Sabemos que el invierno comienza el día más corto del año (y en casi todas las culturas ahí inicia el año, cuando dejan de acortarse y empiezan a alargarse los días, el renacer) y el verano lo contrario; son los dos solsticios (*solstitium*, sol estático). Y el inicio de la primavera y el otoño ocurren cuando el sol está sobre el ecuador, en los llamados equinoccios (*aequinoctium*, igual noche, es decir igual de larga que el día). Además la palabra clima proviene del

Griego *κλίμα* (klima), inclinación del sol (la misma raíz indoeuropea que *clímax*, *declive*, *inclinación*, *clínica*, etc.). Y polo de *πόλος* (polos, pivote, de donde también deriva *polea*; nada que ver con el deporte en el que más se ha destacado Argentina, *hípico*, cuyo nombre viene del tibetano *pulu*, pelota, y lo trajo el Imperio británico).



Principales movimientos de la Tierra (gráficos modificados de Caliver)



ESTACIONES EN EL HEMISFERIO SUR (esquema fuera de escalas)

En fin, pero en tiempos extremadamente remotos las cosas fueron distintas. La Tierra se formó hace unos $4,54 \cdot 10^9$ años tras varios millones de años de agrupamiento –acreción– de materiales orbitales. (En rigor la acreción nunca se detuvo del todo y sigue hoy a razón de 40.000 toneladas anuales de meteoritos que se tiran en picado –la mayoría cayendo en la gran pileta global– y los coleccionistas pagan unos 500 dólares el gramo). La energía cinética de tales cascotazos licuaba las rocas primigenias y mantenía calentísima a la bebé Tierra. En ese contexto, tal lo ya apuntado, la Luna se formó posiblemente a partir de la escombrera orbital que quedó después de chocar la Tierra con un planeta del tamaño de Marte (Teia), o sea un megacascotazo, cuando nuestro mundo sólo contaba unos 30 millones de añitos. Aquel planeta se habría formado simultáneamente en la misma órbita terrestre en uno de los cinco puntos definidos en 1772 por **Giuseppe Lagrange** donde la aceleración gravitatoria de la Tierra y el Sol se anulan mutuamente; parece que andaban como dos corredores distantes en un mismo carril de la pista ovalada, hasta que algo alteró la velocidad de uno de ellos y se embistieron. La Luna, construida con esos escombros, quedó orbitando a menos de 30.000 km de la Tierra, que a su vez había quedado girando sobre sí misma en sólo 4 horas tras el castañazo recibido. Desde entonces nuestro satélite natural se fue alejando y actualmente se nos pianta a razón de 3,8 cm anuales. Y la Tierra bajó un par de cambios.

En verdad la presencia gravitacional de la Luna restringió mucho los movimientos precesionales terrestres y

con ello estabilizó el clima y los océanos. Sin ella el gran bamboleo inicial hubiese durado muchísimo más y la vida hubiese tenido la evolución muy cuesta arriba (y abajo y al costado...), no sería lo que es.

Pero también el Sol se mueve helicoidalmente alrededor de la Vía Láctea (arrastrándonos a nosotros y a todos los demás planetas, lunas, cometas y asteroides) en forma casi ortogonal al plano galáctico principal: cada giro toma 226 millones de años llevándonos a razón de 220 km/s. La última vez que desde acá pudo verse casi la misma parte de nuestra galaxia fue en el Triásico, tiempo de los primeros dinos.

ENVOLTORIOS FLUIDOS

En su conjunto la Tierra tiene 32,1% de hierro, 30,1 de oxígeno, 15,1 de silicio, 13,9 de magnesio, 2,9 de azufre, 1,8 de níquel, 1,5 de calcio, 1,4 de aluminio y 1,2% de otros elementos químicos. Se llama **geósfera** a todo el mundo que pisamos, *sin sus envoltorios fluidos* (la **hidrósfera** y la **atmósfera**).

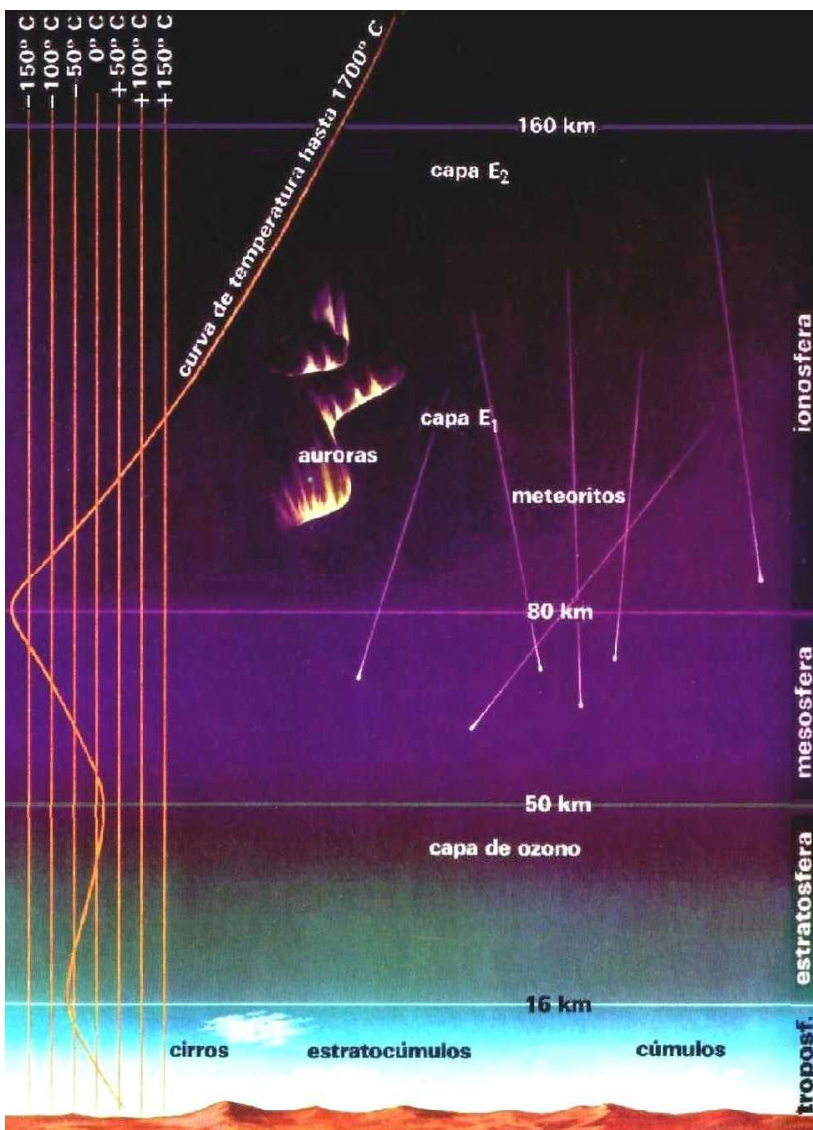
La caída de cometas y la actividad volcánica aportaron mucha agua a la atmósfera, que por enfriamiento se fue acumulando líquida en los mares. Unos 300 millones de años después habrían acaecido los procesos físico-químicos que generaron los primeros seres vivos y otros 700 m.a. más tarde ya había estromatolitos, colonias de cianobacterias que liberaban oxígeno, un subproducto de la fotosíntesis que entre hace unos 1.800 y 2.500 m.a. envenenó a muchísimos organismos anaerobios (la Gran Oxidación) pero sirvió como fuente de energía para los procesos de respiración de criaturas más evolucionadas. Hasta nosotros, que contribuimos creativamente con novedosos y cada vez más letales contaminantes, además de causar una nueva extinción en masa.

Tierra proviene del latín *terra*, que a su vez, como la mayoría del vocabulario romano y griego, procede del idioma indoeuropeo; *ters*, seco: ignoraban que nuestro planeta tiene una superficie no seca en más del 71%. La

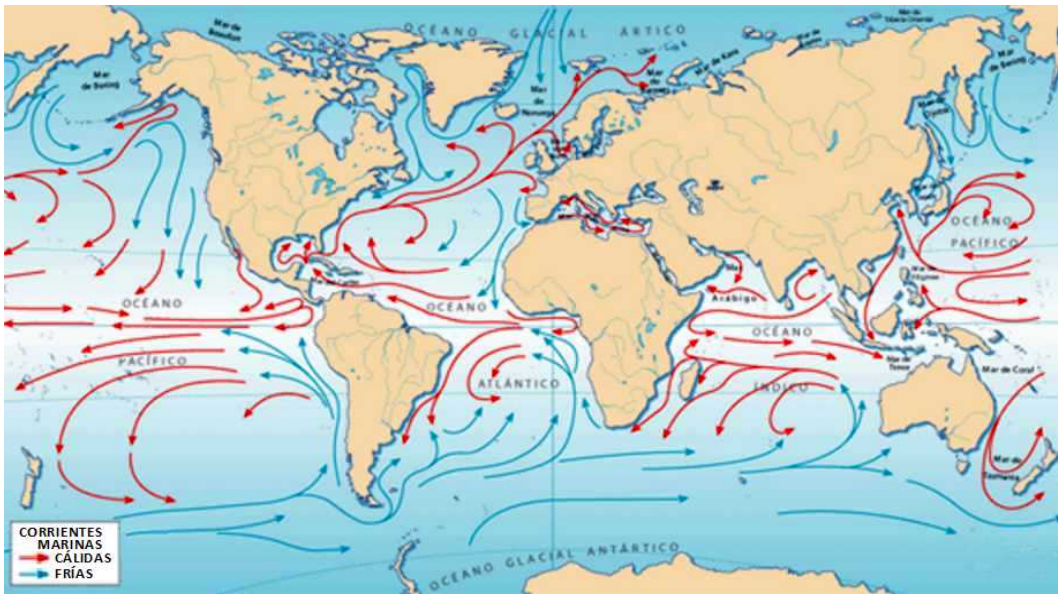
profundidad oceánica media es de 3,73 km (en leve aumento en tanto nuestro actual sobrecalentamiento global va derritiendo las muy secas Antártida y Groenlandia). El 99% de la masa atmosférica ocupa hasta 50 km de altura, lo que es comparable a la cáscara de una manzana, a pesar de que hay raleadísimas moléculas gaseosas hasta 10.000 km de altura. (Y la cola del campo magnético llega a 100.000 km en dirección contraria al Sol).

El color predominante del cielo es el ultravioleta que no podemos ver; el hidrógeno y el nitrógeno actúan como ínfimos diapasones ópticos: al llegar la luz solar blanca vibran sintonizando el UV, dispersando azul y violeta. Los grandes átomos de polvo dispersan en rojizo, como vemos al amanecer y al atardecer. Grandes átomos vibran en bajas frecuencias, como grandes campanas dan sonidos graves. Los hidrógenos y oxígenos son como campanillas o como laringes de cuellos cortos cantando con voz aguda de tenor o soprano. Las nubes contienen gotitas de agua de variado tamaño que dispersan en distintos tonos, cuya suma resulta cercana a blanco.

Otro hecho físico notorio es que el giro de la Tierra superficialmente más acelerado cerca del ecuador que de los polos hace que las corrientes marinas y atmosféricas tiendan a girar en sentido

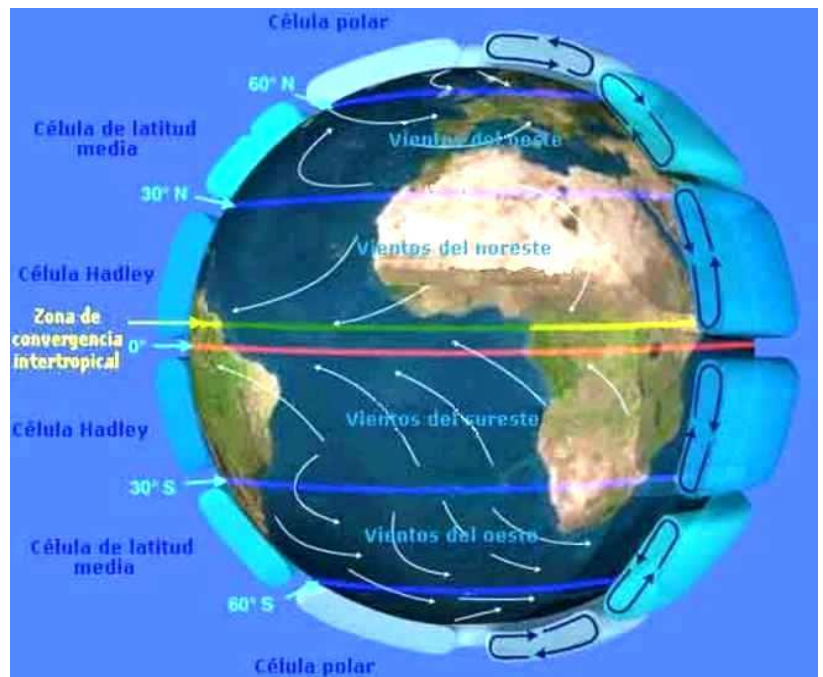
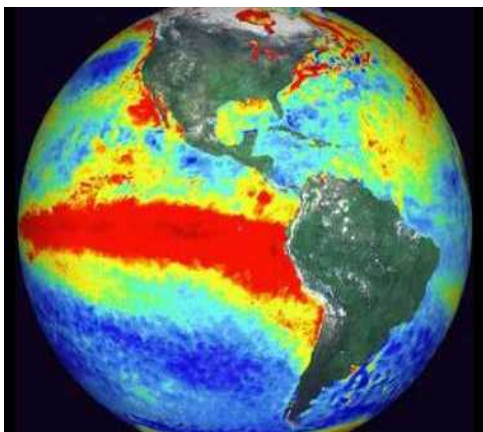


Corte esquemático de la atmósfera terrestre (modificado de Salvat GT)



horario en el hemisferio norte y antihorario en el sur. Esto fue desentrañado por **Gustave Coriolis** en la Francia de 1835 y es el efecto que se observa en un sistema de referencia que se halla en rotación cuando un cuerpo sólido o fluido se mueve respecto a dicho sistema.

Derecha, esquema de células convectivas de los vientos globales (gráfico de la NASA)
 Arriba, modelo de las corrientes marinas, que tienden a seguir un patrón semejante al de los vientos (mapa de Salvat GT)
 Abajo, calentamiento marino superficial durante un evento de El Niño (imagen NASA)



Entre los otros planetas menores del sistema Solar (los más cercanos al Sol), Venus es el que tiene una mayor atmósfera: 96% de anhídrido carbónico, provocando un brutal efecto invernadero, cosa que parece no haber sido así en sus primeros tiempos, ya que pudo tener un océano poco profundo durante 2.000 millones de años.

Al revés, Marte perdió mucha atmósfera, además de todos sus mares primigenios; aunque queda hielo y agua poral y hay ocasionales tormentas de arena de hasta 400 km/hora en su tenue cielo color caramelo. Y Mercurio, por su cercanía al Sol, nunca pudo retener gases ni líquidos sobre su superficie sólida.

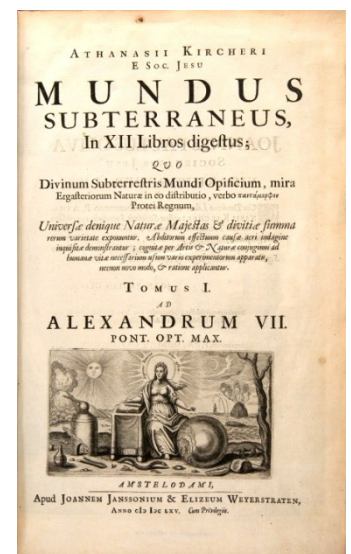
Por otro lado, los planetas mayores tienen enormes atmósferas, Júpiter y Saturno casi totalmente de hidrógeno y helio; Urano y Neptuno además tienen metano y moléculas más complejas. Los cuatro tienen vientos fortísimos (pueden superar los 500 km/hora, con el Guinness para Neptuno con hasta 2.000 km/hora) y existen vórtices con una fluidodinámica semejante a la de nuestros huracanes, de los cuales el más notorio es la Gran Mancha Roja de Júpiter que ha durado siglos, donde cabrían más de dos Tierras. Entre los satélites, el saturniano Titán (algo mayor que Mercurio) tiene una gran atmósfera 95% de nitrógeno, más metano y etano, y lagos de hidrocarburos en sus regiones polares; es lo más parecido a la Tierra primordial, aunque mucho más frío. En torno a Júpiter, Ganimedes, la mayor luna del sistema Solar, tiene una sutil atmósfera de oxígeno y es la única con un campo magnético propio. Europa (otro satélite joviano, apenas menor que nuestra Luna) también posee una atmósfera tenue de oxígeno originada por radiólisis (λυσις, lisis, del griego, soltar) sobre un océano global de agua helada.

GESTACIÓN Y NACIMIENTO DE LA GEOFÍSICA

De Grecia provienen los primeros estudios rigurosos sobre la Tierra y el cielo, que maduraron también en otras civilizaciones (china, maya, etc.). **Aristóteles** en el siglo IV a.C. afirmaba la esfericidad terrestre por la sombra circular sobre la Luna en los eclipses y porque viajando hacia el sur las constelaciones cambian de altura, como de los barcos lejanos sólo vemos sus mástiles. Luego llegó **Eratósthene de Cirene**. Cabe sin embargo apuntar que un siglo y medio después **Poseidonios de Apamea** recalculó la circunferencia terrestre y le resultó el equivalente a 33.100 km, que consideraba un valor más ajustado que el de Eratósthene: obvio, más que ajustado, apretadísimo, ¡porque la Tierra así tenía varios talles menos...! Otro siglo y medio después **Klaudios Ptolemaios** supo vender ese número, y catorce siglos más tarde Christophorus Columbus lo compró tras haber pasado por muchas manos. ¡Y se lo vendió a la reina Isabel! Y por eso él y los suyos zarparon del puerto de Palos (Andalucía) confiando que las Indias Orientales no estarían tan excesivamente lejos. Por suerte, o por inmensa desgracia, según de qué lado se mire, el 12 de octubre de 1492 tropezaron con la costa de la isla que bautizaron Guanahani (una de las Bahamas), Colón no dudó que veía indios e indias... Y acá estamos.

Tras los mil años del Medioevo –tiempo en que la ciencia árabe salvó la ropa de la inundación de oscurantismo cristiano–, al fin el conocimiento de la Tierra se reinventó en el Renacimiento europeo, cuando surgió el moderno método científico con Kopernik, Galileo, Gilbert, Newton y tantísimos más. Incluso con aplicaciones como las del alemán **Georg Bauer** (Gregorio Agrícola), padre de la mineralogía y pionero en temas de minería y metalurgia, con su gran obra *De re metallica* (Sobre la naturaleza de los metales) de 1556 y otros varios tratados, también abordando matemática, química y medicina. Agrícola estuvo entre quienes comenzaron a vincular teoría y práctica. Teoría viene de *θεωρεῖν* (teorein), contemplar, pensar en busca de hipótesis (*ὑπόθεσις*), proposiciones. Práctica viene de *πρακτικός* (practicós), concretar.

El término **geofísica** fue empleado inicialmente por **Julius Fröbel** en 1834 y otros autores en años siguientes, pero recién apareció publicado por primera vez en Alemania gracias a **Adolf Mühry** en 1863: *Beitraege zur geophysik und klimatographie* (Tratado sobre geofísica y climatografía), y luego nuevamente en 1887 en el *Handbuch der geophysik* (Manual de geofísica) de **Siegmund Günther**. Si bien existieron algunas exploraciones geofísicas informales ya desde la alta Edad Media, el primer dispositivo específico para la prospección geofísica data de 1879, el magnetómetro de los suecos **Tobías Thalén** y **Enoch Tiberg**, con el que exitosamente buscaron yacimientos de hierro. Y la primera cátedra de geofísica la debemos a **Emil Wiechert**, en 1898 en Göttingen, Alemania. Eran tiempos en los que hacer ciencia *grossa* exigía saber idioma alemán. Ya no latín ni francés. Ni todavía inglés. No habían comenzado las invasiones y masacres para apoderarse del petróleo ajeno. Pero había otras.



Observatorio Maya en Chichén Itzá, México (foto Bruno Girin) y portada de *Mundus subterraneus* del alemán Athanasius Kircher, 1664, libro de gran influencia en las primeras teorías sobre el interior de la Tierra (foto Oklahoma University)

Mina de Oro en Kibali, Congo (foto Randgold Ltd.)



En la playa cadáveres alineados de migrantes naufragados que huían de la miseria; en el horizonte buques llevando petróleo de África hacia Europa

Zawiya, Libia, 21-02-2017, Lucia Goracci (imagen Rai News 24)

CIENCIAS AFINES

La **geografía** describe la Tierra, tanto en sus aspectos naturales como humanos. Pero las ciencias vinculadas más estrechamente con la geofísica son la **geología** y la **física**, que a su vez emplea la **matemática**, del griego *μαθηματικός* (mathematikós), afecto a aprender (¿qué tal?). La geología estudia específicamente los materiales inertes de nuestro planeta (principalmente las rocas) de manera directa y por tanto restringida a las capas más superficiales, complementándose con la geofísica que obtiene información más profunda. En menor grado también es una ciencia afín la **geoquímica** (que hace sus abordajes indirectos a través de la química).

Ahora bien, en su definición en sentido amplio están incluidas en la geofísica disciplinas que a veces son consideradas independientes, tales como **aeronomía**, **meteorología**, **oceanología**, **hidrología** u otras que se relacionan con la geología como **geodinámica** y **tectonofísica**. A su vez la **planetofísica** (que estudia los planetas, y por extensión también lunas, asteroides y cometas) puede considerarse emparentada o hasta de hecho más amplia, inclusiva de la geofísica. Y también hay algunos vínculos con la **astrofísica** (que aborda la física de las estrellas), si bien en entornos físicos muy diferentes. La exploración y monitoreo mediante **fotografías aéreas e imágenes de diverso espectro (visible, ultravioleta, radar, etc.)** también se vinculan con la geofísica, pero suelen ser abordadas separadamente.

En su definición en un sentido más restringido están comprendidas dentro de la geofísica la **gravimetría** (conectada con la **geodesia**, que estudia la forma del planeta en perspectiva astronómica), la **magnetometría** (y sus emparentadas **geomagnetismo** y **paleomagnetismo**), la **geolectricidad**, la **sismología** y dos subdisciplinas también vinculadas con la geología: la **radiometría** (relacionada con la **geocronología**) y la **geotermia** (conectada con la **vulcanología**). **Metría** viene del griego *μέτρον* (métron), medición.

En todas estas subdisciplinas existen vertientes puras y prospectivas, las primeras netamente cognoscitivas y las segundas aplicadas al hallazgo de recursos económicos (minerales, agua, hidrocarburos, etc.) o resolución de diversas problemáticas (fundaciones, remediaciones medioambientales y otras). Pero esta diferenciación suele ser de difícil discernimiento, ya que muchas investigaciones puras resultan después en aplicaciones productivas y, a la inversa, muchos trabajos de prospección (en inglés *surveying*) redundan más tarde en conocimientos académicos, realimentándose mutuamente, como ocurre en la ciencia y la tecnología en general.

Las dos vertientes se comparan esquemáticamente a continuación:

Geofísica Pura

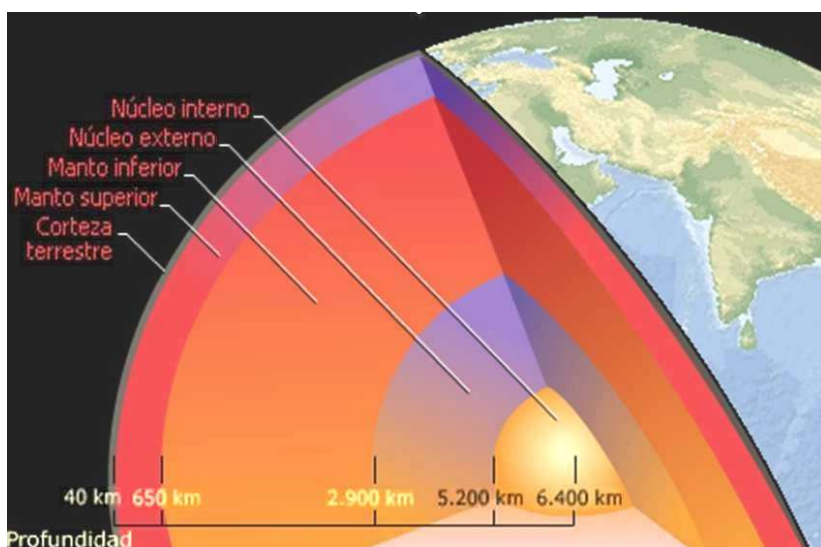
Gravimetría (con Geodesia)
Magnetometría (con Geo y Paleomagnetismo)
Geolectricidad
Radiometría (con Geocronología)
Geotermia (con Vulcanología)
Sismología

Geofísica Aplicada

Prospección Gravimétrica
Prospección Magnetométrica
Prospección Geoelectrica (Corriente Continua o Alterna)
Prospección Radiométrica
Prospección Geotérmica
Prospección Sísmica (Acústica, Refracción y Reflexión)

El **Perfilaje de Pozos** es una subdisciplina común a cada metodología geofísica, cuando ésta se aplica a la obtención de datos dentro de una perforación, y es reconocido su desarrollo enorme, principalmente a partir de los requerimientos de la exploración y explotación de los hidrocarburos.

Conformación del interior de nuestro planeta, la geósfera, a la luz de la geofísica (modificado de ingv.it)



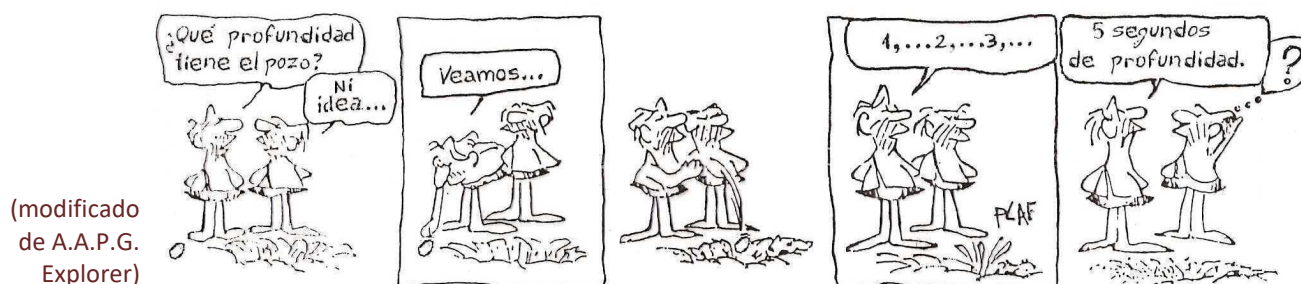
LA ANOMALÍA

Es el concepto central de la **geofísica prospectiva** (del latín *prospicere*, examinar). De lo que se trata es de registrar, procesar y graficar la respuesta dada por distintos campos físicos en las áreas de potencial interés exploratorio o de desarrollo de recursos. Y entonces **buscar los sectores de valores anómalos respecto al fondo regional** e interpretarlos en términos geológicos a fin de determinar los sitios de

interés. La geofísica, como toda observación humana de cualquier índole, sólo detecta **discontinuidades**, es decir cambios –técnicamente medibles–, de las propiedades físicas a través del espacio o del tiempo. Y también debe tenerse presente que no importan tanto los **valores absolutos** de lo que se mida, sino más bien las diferencias, o sea los **valores relativos**, respecto de zonas o tiempos cercanos. Absoluto es un gradiente geotérmico de $0,039^{\circ}/m$; relativo es que ese valor sea $0,007^{\circ}/m$ mayor que el de un área vecina.

La búsqueda de anomalías se hace, antes que nada, **evaluando información previa de las potenciales áreas a prospectar en función de los objetivos planteados**, para comenzar allí donde las condiciones geológicas y de factibilidad económica sean *a priori* más promisorias. Cuando se ha definido el área, se establece el **mallado de mediciones**, ya sea que tales mediciones se hagan a lo largo de trayectorias predefinidas (paralelas entre sí, o formando una cuadrícula, o cualquier otra figura que se considere oportuna) o bien si son puntos más o menos distantes ubicados según las facilidades y dificultades geográficas de la zona. Usar una malla de muestreo numérico más fina o más gruesa –es decir, hacer mediciones más cercanas o más lejanas entre sí– dependerá indirectamente de la escala del trabajo –por cuestiones prácticas y de costos–, pero fundamentalmente dependerá del **tamaño mínimo de las anomalías de interés**. En otras palabras, la red es más cerrada o abierta según sea el tamaño de los peces que queremos capturar.

Tras el planeamiento inicial, se entra en la etapa de **registro o adquisición** (de *adquirire*, para buscar) de los datos de campo: posicionamiento y mediciones físicas que se hacen con los correspondientes receptores (equivalentes de la radio, la tele, etc.), para lo cual **se hacen pruebas de campo previas a fin de optimizar los parámetros**. Luego se pasa a la segunda etapa, la de **cálculos correctivos o reducciones que constituyen el procesamiento** (de *processus*, adelante marchar) necesario para homogeneizarlos, es decir hacerlos comparables, y poder entonces graficarlos. Para finalmente hacer la tercera etapa de **interpretación** (de *interpretari*, entre preciar) **en términos geológicos y eventualmente de recursos potencialmente explotables**. Aquí es fundamental la traducción del lenguaje de la física al lenguaje concretamente aplicado.



Debe diferenciarse **señal** (de *signum*), los datos registrados que nos interesan, del **ruido** (de *rugitus*, al igual que rugido), algo fútil que suele interferir y hasta asustar... y que procuraremos evitar en la adquisición, suprimir o al menos reducir al aplicar las reducciones del procesamiento y, de persistir, al menos tenerlos en cuenta durante la interpretación para no caer en conclusiones erróneas.

Los datos pueden presentarse en forma de **perfiles de pozo** (también denominados **diagrfías** o **testificación de pozo** o **sondeo** –en inglés *logs*– que son datos esencialmente unidimensionales en el eje z o 1D, salvo componentes de desviación horizontal del pozo), **perfiles horizontales** (conocidos como **calicatas**, en el eje x o y , 1D), **cortes** (también llamados **secciones verticales**, **tomografías** o **transectas**, en este caso bidimensionales en x, z , o sea 2D), **mapas** (**planos** o **secciones horizontales**, que también son datos 2D pero llevados a una vista en planta x, y en lugar de vertical), o **volúmenes** de información (tridimensional o 3D, en x, y, z , también denominados **cubos** aunque su forma poliédrica sea otra). Y también cualquiera de estas configuraciones incorporando la variable de **cambio temporal** (en inglés *time-lapse*), esencialmente allí donde se está explotando un recurso y los registros físicos se modifican en función de la disminución del mismo, por lo cual en todos los casos se agrega la dimensión tiempo: por ejemplo un volumen (3D) pasa a un delta de volumen ($\Delta 3D = 4D$, con x, y, z, t).

Las curvas que unen puntos de igual valor de la magnitud física relevada se denominan **isoanómalas**, aunque no necesariamente estemos en presencia de una anomalía significativa. Y los perfiles o cortes o mapas o volúmenes son denominados genéricamente **gráficas de anomalía** gravimétrica, magnética, radiométrica, de velocidades sísmicas, etc. **El área anómala en el mapa casi siempre resulta mayor que el área interesada por los emplazamientos geológicos profundos que la causan, dada su influencia lateral en la superficie.**

La prospección geofísica suele hacerse sobre la superficie **terrestre**, pero también dentro de **pozos**, o puede ser **marina** (o lacustre o fluvial, desde barcos, lanchas, gomones, etc.), **aérea** (aviones, helicópteros, globos, drones)

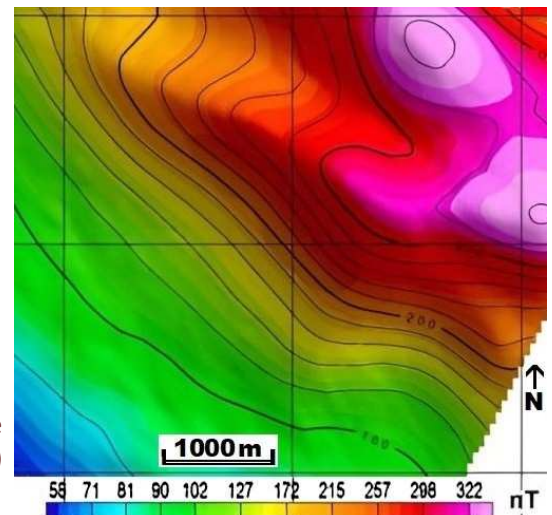
e incluso **satelital**, dependiendo de las limitaciones inherentes a las magnitudes físicas a medir –como ejemplos, la radioactividad medida sobre el mar es casi nula y las ondas sísmicas pierden sus propiedades distintivas al entrar al aire– y también según las tecnologías disponibles y sus costos. Las modalidades aéreas, por caso, son más costosas, pero se tornan económicas con drones o cuando se releva un área muy extensa.

El grado de **resolución** (detección de detalle o calidad de enfoque) varía con la escala y la profundidad y debe preverse lo mejor posible. Toda vez que interviene una función de onda (componente residual del campo de gravedad o magnético, ondas electromagnéticas, sísmicas, etc.) **cuanto mayor es la frecuencia o el número de onda, mayor (o sea, mejor) es la resolución de la geología de pequeña escala**. Pero lamentablemente las ondas de corto período (longitud de onda corta) se atenúan con la distancia y para ver eventos profundos hay que emplear ondas largas (de baja frecuencia y bajo número de onda) y resignarse a perder detalles.

Es muy importante tener en cuenta que **distintas realidades del subsuelo pueden producir similares anomalías geofísicas**: no existe correspondencia biunívoca entre anomalías geofísicas y modelos geológicos, es decir, no hay una función biyectiva entre ambos conjuntos, sino que ésta es de tipo sobreyectivo. A cada anomalía geofísica le puede corresponder más de un modelo geológico, usualmente muchos alternativos, lo cual hace indispensable la cuidadosa evaluación de todos los antecedentes geológicos, geoquímicos, de pozos, de otros métodos geofísicos, etc. **Y recordar que la esencia del método científico es hallar el modelo que mejor ajusta con todos los datos disponibles**, ¡no forzar los datos al modelo que mejor nos pinte!



Prospección aérea de datos magnetométricos en Australia (foto LCT Airborne Services)



Mapa resultante de una adquisición magnética (modificado de JOUAV, China)

UTILIZACIÓN DE LOS MÉTODOS GEOFÍSICOS

Pensar viene del latín *pendere*, pender, pesar, sopesar. Pensemos entonces en este viaje virtual Tierra adentro. Para alcanzar los objetivos, además de los medios disponibles, es imperioso basarse en todo el conocimiento conexo previamente adquirido, en la máxima objetividad posible (pero tratando de no contradecir mucho a la jefatura...) y en el trabajo interdisciplinario.

Las condiciones que favorecen o aconsejan el empleo de los métodos geofísicos incluyen, en primer lugar, la **insuficiente información obtenida por métodos más directos de menor costo** (como la geología de superficie, la geoquímica, o la información de perforaciones preexistentes, entre otros), insuficiencia que puede deberse a escollos técnicos o a un presupuesto pobre. En segundo lugar, la **existencia de respuestas físicas medibles** en función de los prospectos de interés geológico, sean éstos de índole económica o puramente académica. En tercer lugar, la **factibilidad de resolución técnico-práctica** en la ejecución de el o los métodos potencialmente útiles (instrumental apropiado, accesibilidad geográfica, etc.). Y naturalmente, en cuarto lugar, las ecuaciones de costos (gastos o inversiones) y los potenciales beneficios, o sea una **buena relación costo/beneficio**, ya sea en etapas de exploración o de explotación.

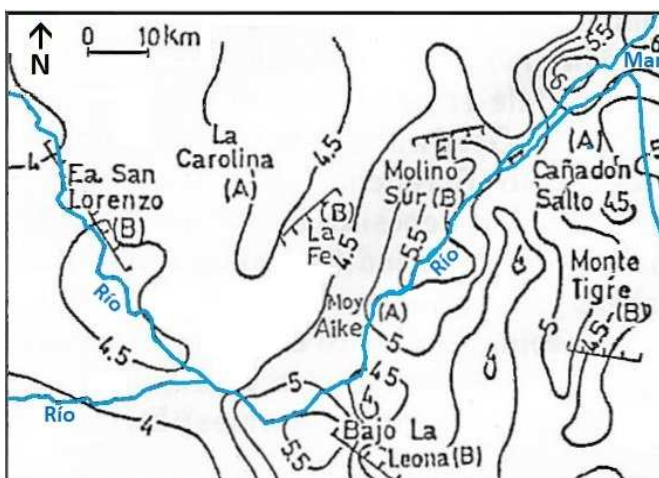
La interpretación de las anomalías geofísicas puede habilitar estimaciones más o menos confiables sobre las características geológicas, dimensiones y ubicación de los emplazamientos de interés. Son muy importantes para tomar apropiadas decisiones sobre variados temas, por ejemplo definir fundaciones de obras civiles, confirmar ocurrencias mineras, calcular recursos o posibles reservas de yacimientos (del latín *iacere*, yacer), o establecer programas de exploración o explotación. Naturalmente, visto que los sitios con yacimientos son la excepción y no la regla, las prospecciones geofísicas suelen ser negativas, hecho igualmente valorable dado que permite descartar áreas y ahorrarse de aplicar métodos más onerosos, por ejemplo nuevos pozos. En cualquier caso, la geofísica prospectiva del interior terrestre es por excelencia la “ciencia de lo oculto” y suele tener prácticas que a

los profanos pueden parecerles esotéricas –muchas veces no les falta razón– y, como ocurre a los ingenieros petroleros, geólogos y médicos, los errores quedan enterrados...

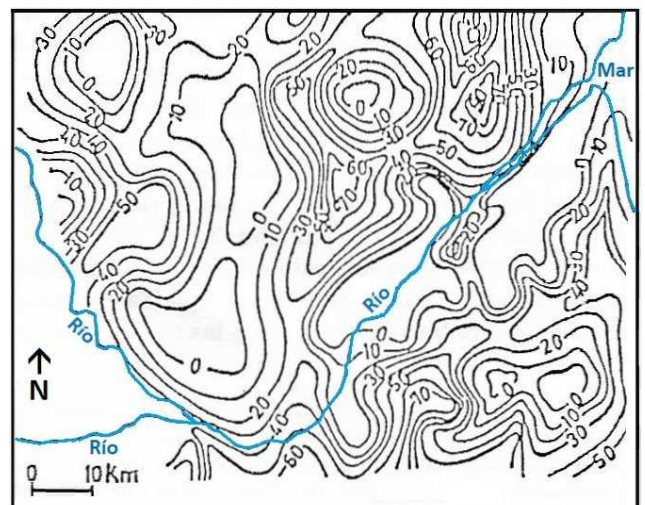
Ahora bien, si la información directa es insuficiente, *dada la existencia de respuestas físicas para varios métodos con respuestas comparables, serán las posibilidades de abordaje práctico de la problemática a resolver –que incluyen las condiciones de seguridad laboral y resguardo medioambiental– y las diferentes alternativas de costos versus beneficios las que permitirán tomar la decisión de emplear uno u otro método geofísico, con tal o cual modalidad, o varios de ellos de manera complementaria, o ninguno.* La relación costo/beneficio estará siempre presente, incluso cuando el beneficio no sea netamente económico sino más bien cualitativo en términos de un conocimiento buscado por su importancia científica o el prestigio académico. Gastamos más (recursos técnicos, mano de obra, esfuerzos, tiempo) cuando creemos poder ganar más. Apostamos más cuando el premio es mayor, o bien mayor es la probabilidad de ganarlo.

Explotar viene del francés *exploiter*, sacar provecho (a su vez del latín *ex-plicitare*, desplegar), desarrollar. Pero primero hay que catear (del latín *captare*, captar, en nuestro caso datos; aunque más lindo es catar vinos, o sea captar sus sabores y fragancias). Catear es sinónimo de explorar (*ex-plorare*), para lo cual a veces hay que implorar (*in-plorare*). *Plorare* es el latín de donde viene llorar... O sea... como una borrachera triste.

Los proyectos de exploración y desarrollo siguen etapas de creciente complejidad y por tanto lo mismo sucede con los métodos geofísicos empleados, siempre según los objetivos planteados y el presupuesto disponible. Suele comenzarse con opciones de menor costo (gravimetría, geoelectrónica, geotermia u otras opciones de trabajo de campo con vehículos o a pie), luego vienen las alternativas marinas o aéreas (magnetometría, electromagnetismo, radiometría) y la sísmica suele ir al final: refracción, reflexión 2D, luego 3D. Siempre con la complementación de las otras disciplinas geocientíficas e ingenieriles que se van sucediendo en paralelo a lo largo de un determinado proyecto. Cada planteo aplicado o puramente científico tiene sus particulares ingredientes y la receta debe ser adaptada para conseguir saborear el mejor resultado final.



Gradiente geotérmico ($^{\circ}\text{C}/100\text{m}$). (A): alto estructural jurásico. (B): bajo estructural jurásico y falla maestra.



Plano isópaco de la Fm Springhill (m). Autor: A.Viera (YPF)

Área del medio y bajo río Coyle, Santa Cruz; cotejo de datos geotérmicos con los de espesores de la principal formación que oficia de reservorio petrolífero en la cuenca Austral; informaciones obtenidas de pozos (modificado de Chelotti, 1992)

Desde que con los métodos geofísicos empezó a hallarse petróleo y gas natural, a partir de 1920, el progreso técnico-científico se aceleró, tanto como resultado de la competencia comercial como por el desafío de hallar y desarrollar depósitos cada vez más complicados, incluyendo las posteriores operaciones de mantenimiento (*pulling*) y de reacondicionamiento (*workover*), con frecuencia para intentar incorporar capas productivas antes descartadas, porque los yacimientos fáciles ya fueron. Y estas consideraciones son también aplicables a los recursos mineros sólidos (metalíferos, carboníferos, radiactivos, rocas de construcción y otros), a hidrogeología, estudios para fundaciones, arqueología, evaluaciones ambientales del subsuelo, etc.

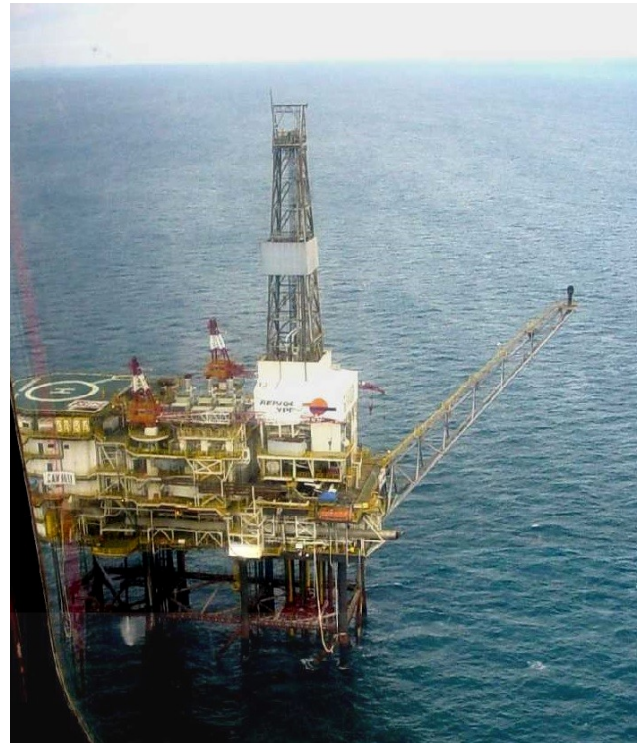
Actualmente más del 95% de la inversión mundial en estudios geofísicos está vinculada con actividades petroleras y cerca del 90% del gasto en geofísica corresponde a prospección sísmica y acústica. Estos porcentajes son atinentes también al *impacto medioambiental de los distintos métodos geofísicos*, tópico más crítico para la sísmica dado el muy superior despliegue de recursos. Que a su vez son mucho más conspicuos cuando se trata de mares u océanos. (Mar proviene del latín *mare*, océano del griego $\Omega\kappa\epsilon\alpha\nu\acute{o}\varsigma$, Okeanós, que era

el mayor de los Titanes, la gran extensión de agua que rodeaba el mundo).

Hoy el mundo está envuelto en redes virtuales. Trabajo en remoto, inteligencia artificial y otras realidades nuevas obviamente permean la geofísica.

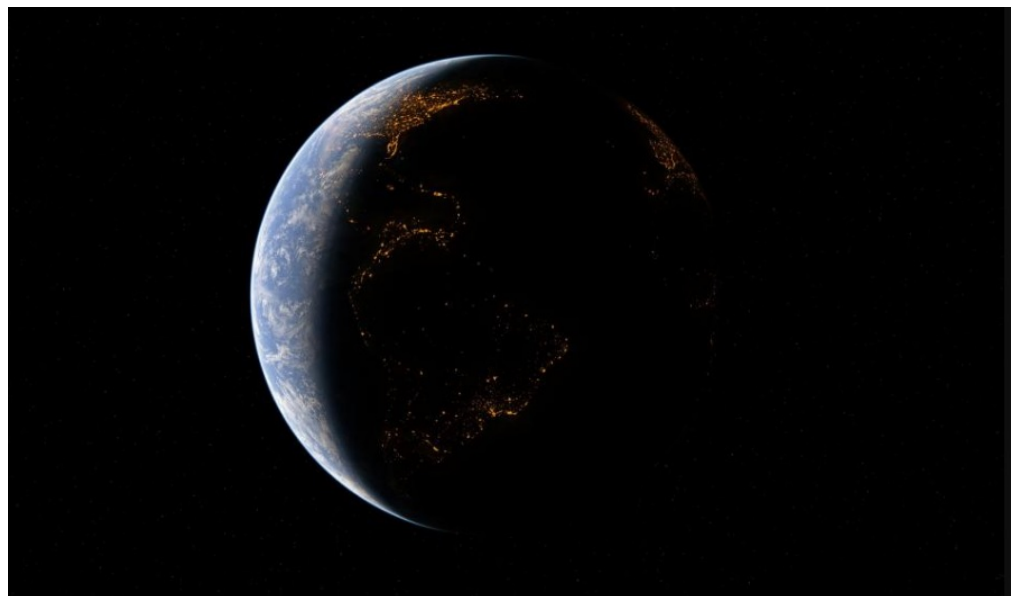
Por último, una definición de autor anónimo, no pocas veces verídica, publicada por la revista de la *American Association of Petroleum Geologists* (contraparte natural de la *Society of Exploration Geophysicists*, así como de la *Society of Petroleum Engineers*):

“A Geophysicist is a person who passes as an exacting expert on the basis of being able to turn out with prolific fortitude infinite strings of incomprehensible formulae calculated with micrometric precision from vague assumptions which are based upon debatable figures taken from inconclusive experiments carried out with instruments of problematic accuracy by persons of doubtful reliability and questionable mentality for the avowed purpose of annoying and confounding a hopeless group of fanatics known as Geologists who are themselves the lunatic fringe surrounding the hard-working Oil Operator.”



Plataforma petrolera en alta mar (foto Facundo Rucci)

Intentaremos no molestar demasiado ni proseguir contribuyendo a la confusión del lector, sea éste cualquiera otra fuese su formación previa. En el peor de los casos, esperamos al menos ayudar a conciliar el sueño...



(imagen besthdwallpaper.com)

CUESTIONARIO BÁSICO

- ¿Cuáles son los campos físicos fundamentales y qué los caracteriza?
- Sintetizar el origen del sistema Solar.
- Dar una definición de geofísica.
- Comentar los movimientos terrestres y lunares y su evolución en el tiempo.

- ¿Qué características básicas tienen las capas fluidas de la Tierra?
- ¿Cuáles ciencias son afines a la geofísica?
- Comentar brevemente los antecedentes históricos.
- ¿En qué se fundamenta la separación en geofísica pura y aplicada?
- Definir anomalía geofísica.
- ¿Qué es el grado de resolución y de qué depende?
- ¿Qué tareas sucesivas básicas se siguen en cada relevamiento geofísico?
- ¿De qué depende la densidad del muestreo de datos?
- ¿Cuáles dimensiones pueden tener los registros geofísicos y desde dónde se pueden obtener?
- ¿Qué condiciones favorecen el empleo de estos métodos?
- ¿En base a qué se decide el orden de aplicación de distintos métodos geofísicos en una misma área?

BIBLIOGRAFÍA DE REFERENCIA

- Barron, E., 1992. Paleoclimatology. En *Understanding the Earth* (p 485-505); Brown, G., Hawkesworth, C. & Wilson, C. Eds. Cambridge University Press.
- Burger, H., 1992. *Exploration geophysics of the shallow subsurface* (p 1-6). Prentice-Hall.
- Cantos Figuerola, J., 1972. *Tratado de geofísica aplicada* (p 23-34). Librería de Ciencia e Industria.
- Chelotti, L., 1992. Rasgos tectónicos del área del medio y bajo río Coyle, cuenca Austral. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, V.47 N°2 (p 129-134).
- D'Alessandro, A., Bucalo, F., Coltelli, M. & Martorana, R., 2015. Drones: new technology for geophysics? *Near Surface Geoscience Conference* (p 1-5). 21st European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics.
- Dimri, V., 1998. Fractal behavior and detectability limits of geophysical surveys. *Geophysics*, V.63 N°6 (p 1943-1946).
- Ferrari, A., 2011. *Stelle, galassie e Universo, fondamenti di astrofisica* (560 p). Springer-Verlag.
- Forte, S. & Rottoli, L., 2019. *Fisica quantistica* (368 p). Zanichelli Editore.
- Fowler, C., 1990. *The solid Earth* (p 1-3). Cambridge University Press.
- Francis, P., 1992. *Exploration of the Solar System*. En *Understanding the Earth* (p 3-24); Brown, G., Hawkesworth, C. & Wilson, C. Eds. Cambridge University Press.
- Griffiths, D. & King, R., 1972. *Geofísica aplicada para ingenieros y geólogos* (p 13-18). Editorial Paraninfo.
- Howell, B., 1962. *Introducción a la geofísica* (p 14-18). Ediciones Omega.
- Lowrie, W., 1997. *Fundamentals of geophysics* (p 1-9). Cambridge University Press.
- Lunine, J., 1999. Evolution of a habitable world (p 3-34, 101-107, 144-152, 177-195, 211-222). Cambridge University Press.
- Orellana, E., 1972. *Prospección geoeléctrica en corriente continua* (p 23-26). Editorial Paraninfo.
- Parasnis, D., 1971. *Geofísica minera* (p 19-35). Editorial Paraninfo.
- Dobrin, M., 1976. *Introduction to geophysical prospecting* (p 1-24). McGraw-Hill.
- Robinson, E. & Coruh, C., 1988. *Basic exploration geophysics* (p 1-13). John Wiley & Sons.
- Sharma, P., 1976. *Geophysical methods in geology* (p 1-5). Elsevier Scientific Publishing Co.
- Sheriff, R., 1991. *Encyclopedic dictionary of exploration geophysics* (376 p). Society of Exploration Geophysicists.
- Taylor, S., 1992. *The origin of the Earth*. En *Understanding the Earth* (p 25-43); Brown, G., Hawkesworth, C. & Wilson, C. Eds. Cambridge University Press.
- Telford, W., Geldart, L., Sheriff, R. & Keys, D., 1976. *Applied geophysics* (p 1-6). Cambridge University Press.
- Udías, A. & Mezcuá, J., 1997. *Fundamentos de geofísica* (p 19-35). Alianza Editorial.
- Van Andel, T., 1991. *New views on an old planet* (p 193-222). Cambridge University Press.

- Wallace, J. & Hobbs, P., 2006. Atmospheric science: an introduction survey (483p). Elsevier Academic Press.
- Yuan, Q., Li, M., Desch, S. *et al.*, 2023. Moon-forming impactor as a source of Earth's basal mantle anomalies. Nature, V.623 (p 95-99).

Los posibles errores y sesgos contenidos en estas Glosas de Geofísica son sólo atribuibles al primero de los autores.