

MISTERIOS Y RAREZAS DEL FINAL DEL PRECÁMBRICO: UN ENFOQUE PALEOMAGNÉTICO

Augusto E. Rapalini

*Laboratorio de Paleomagnetismo Daniel A. Valencio, Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales de Buenos Aires (IGEBA), Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires – CONICET
rapalini@gl.fcen.uba.ar*

RESUMEN

El Ediacarano (o Ediacárico) es el período terminal del Precámbrico, extendiéndose desde los 635 hasta los 541 millones de años (Ma). Durante ese lapso el planeta parece haber experimentado una serie de eventos y procesos extraordinariamente singulares, cuya real existencia y características detalladas son motivo de numerosos debates y controversias. Algunos de los acontecimientos que con mayor o menor certeza se investigan, discuten y analizan en la actualidad son: 1) la aparición de la primera biota compleja de organismos multicelulares de la historia de la Tierra pero que no dejaría sucesores en el Fanerozoico; 2) la mayor excursión isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ de la historia del planeta (excursión Shuram) y su relación con la evolución de los océanos; 3) la existencia de una glaciación que alcanzó bajas latitudes (glaciación Gaskiers) y sus impactos paleoambientales globales; 4) La cronología y cinemática de la ruptura final del supercontinente Rodinia y de la subsecuente formación del Gondwana; 5) la existencia de desplazamientos polares verdaderos muy veloces y de cerca de 90° por intercambio de los ejes de inercia del planeta; 6) la posibilidad de que los polos magnéticos estuvieran ubicados durante largos lapsos en el ecuador; 7) un campo magnético ultradébil, con la menor paleointensidad registrada; 8) un campo magnético hiperactivo, con la máxima frecuencia de reversiones de polaridad conocida; 9) el posible inicio de la formación del núcleo interno y el subsecuente cambio en la modalidad de la geodínamo terrestre; entre varios más. A través de estudios paleomagnéticos sistemáticos es posible aportar información muy valiosa para resolver muchos de estos interrogantes. Desde hace dos décadas, en el Laboratorio de Paleomagnetismo Daniel A. Valencio del IGEBA venimos desarrollando estudios multidisciplinarios sistemáticos en rocas sedimentarias y volcánicas ediacaranas del cratón del Río de la Plata. Estas investigaciones se nutren de una colaboración estrecha y continua con colegas de otros grupos de investigación de Argentina, Brasil y Uruguay. Los estudios incluyen principalmente investigaciones paleomagnéticas con el fin de reconstruir la evolución paleogeográfica del cratón en el Ediacarano y aportar a conocer la cinemática de la formación del Gondwana. Recientemente estamos también avanzando en el conocimiento de las reversiones de polaridad del paleocampo magnético en el Ediacarano tardío. Dataciones geocronológicas precisas, estudios isotópicos sistemáticos y recientes hallazgos fósiles espectaculares, sumados a la información paleomagnética, están aumentando significativamente nuestro conocimiento de un período hasta hace dos décadas casi desconocido. Estos avances incluyen una reconstrucción esquemática de la evolución paleogeográfica del cratón del Río de la Plata entre aproximadamente 600 y 550 Ma, durante el cual el mismo habría migrado desde bajas a altas latitudes. Con esta información y la de otros cratones de Gondwana Occidental están surgiendo restricciones a las edades de anexión con Congo-São Francisco y África Occidental. También permiten especular con mayor sustento observacional sobre la posible existencia (o no) de un gran océano llamado Clymene en etapas

finales de formación del Gondwana. El probable registro de la excursión Shuram en sedimentos calcáreos del cratón es una posibilidad concreta a medida que avanzan los estudios quimioestratigráficos. Si bien aún de modo incipiente, los primeros resultados magnetoestratigráficos que estamos obteniendo sugieren la aparente presencia de rápidas reversiones de polaridad. Esta sucesión de nuevos resultados marca límites a ciertos modelos o propuestas no actualistas mientras que es compatible con otros, abriendo un importante número de nuevos interrogantes. En este trabajo se presenta un breve resumen del conocimiento actual a nivel global de muchas de estas controversias, así como del avance de las investigaciones en nuestro país.

PALABRAS CLAVES: HISTORIA DE LA TIERRA; PALEOMAGNETISMO; PERIODO PRECAMBRICO

ABSTRAC

The Ediacaran (or Ediacaran) is the terminal period of the Precambrian, extending from 635 to 541 million years ago (Ma). During this period the planet appears to have experienced a series of extraordinarily singular events and processes, whose actual existence and detailed characteristics are the subject of much debate and controversy. Some of the events that are more or less certainly investigated, discussed and analyzed at present are: 1) the appearance of the first complex biota of multicellular organisms in Earth's history but which would leave no successors in the Phanerozoic; 2) the largest $\delta^{13}\text{C}$ isotopic excursion in the history of the planet (Shuram excursion) and its relationship with the evolution of the oceans; 3) the existence of a glaciation that reached low latitudes (Gaskiers glaciation) and its global paleoenvironmental impacts; 4) the chronology and kinematics of the final rupture of the supercontinent Rodinia and the subsequent formation of Gondwana; 5) the possibility of very fast true polar displacements of about 90° by exchange of the inertial axes of the planet; 6) the possibility that the magnetic poles were located for long periods at the equator; 7) an ultraweak magnetic field, with the lowest paleointensity on record; 8) a hyperactive magnetic field, with the maximum frequency of known polarity reversions; 9) the possible beginning of the formation of the Internal nucleus and the subsequent change in the mode of the terrestrial geodynamo; and many more. Through systematic paleomagnetic studies it is possible to provide valuable information to resolve many of these questions. For two decades, in the Daniel A. Valencio Paleomagnetism Laboratory of the IGEBA we have been developing systematic multidisciplinary studies in sedimentary and volcanic Ediacaran rocks of the Río de la Plata craton. These investigations are nurtured by a close and continuous collaboration with colleagues from other research groups in Argentina, Brazil and Uruguay. The studies include mainly paleomagnetic investigations in order to reconstruct the paleogeographic evolution of the Ediacaran craton and to contribute to understand the kinematics of the formation of Gondwana. Recently we are also advancing in the knowledge of the polarity reversions of the magnetic paleofield in the late Ediacaran. Accurate geochronological dating, systematic isotopic studies and recent spectacular fossil finds, in addition to paleomagnetic information, are significantly increasing our knowledge of a period that until two decades ago was almost unknown. These advances include a schematic reconstruction of the paleogeographic evolution of the La Plata River craton between approximately 600 and 550 Ma, during which time it would have migrated from low to high latitudes. With this information and that of other West Gondwana cratons, constraints on the ages of annexation with Congo-São Francisco and West Africa are emerging. They also allow speculation with more observational support on the possible existence (or not) of a big ocean called Clymene in late stages of Gondwana formation. The probable record of the Shuram excursion in calcareous sediments of the craton is a concrete possibility as chemostratigraphic studies progress. Although still incipient, the first magnetostratigraphic results we are obtaining

suggest the apparent presence of rapid polarity reversions. This succession of new results marks limits to certain models or non-current proposals while it is compatible with others, opening an important number of new questions. In this paper we present a brief summary of the current global knowledge of many of these controversies, as well as the progress of research in our country.

KEYWORDS: HISTORY OF THE EARTH; PALEOMAGNETISM; PRECAMBRIAN PERIOD

INTRODUCCIÓN

El Precámbrico constituye aproximadamente el 88% de la historia de la Tierra. Comprende desde la formación de nuestro planeta hace unos 4550 millones de años (Ma) hasta la denominada “explosión cámbrica” hace 541 Ma (ej. Marshall, 2006, Briggs, 2015 y referencias ahí citadas). Este enorme lapso ha sido subdividido en tres grandes eones (Gradstein et al., 2020): Hadeano (hasta los 4000 Ma), Arqueano (entre 4000 y 2500 Ma) y Proterozoico (entre 2500 y 541 Ma). El último período del Proterozoico es conocido como Ediacarano (o Ediacárico) y sus límites están establecidos entre 635 Ma y 541 Ma (Xiao y Narbonne, 2020). El inicio está determinado por la finalización de la última glaciación global, llamada “Marinoan”, que habría afectado latitudes ecuatoriales y ha sido interpretada como un evento de varios millones de años en que la Tierra estuvo mayormente cubierta de hielo (“Snowball Earth”, Hoffman et al., 1998; Prave et al., 2016). A la fecha mucho se ha avanzado en el conocimiento del Ediacarano en aspectos paleontológicos, estratigráficos, geocronológicos, paleogeográficos y paleoambientales (véase Xiao y Narbonne, 2020, para un resumen actualizado). Sin embargo, a medida que más y mejor información es extraída del registro geológico de este período, más y mayores peculiaridades aparecen, sugiriendo que estamos en presencia de un lapso extraordinariamente particular de la historia de nuestro planeta. En los próximos apartados se presenta una reseña muy sucinta de varias de estas “rarezas y misterios”, algunas de las principales controversias suscitadas y algunos avances logrados por un trabajo multidisciplinario que se está llevando adelante entre grupos de investigación de Buenos Aires, La Plata, Sao Paulo y Montevideo.

Las “Faunas” Ediacaranas

El Ediacarano toma su nombre de una localidad de Australia donde a mediados del siglo 20 se reconocieron asociaciones de impresiones fósiles de cuerpos blandos en sedimentitas del Precámbrico tardío. El reconocimiento de la existencia de una biota compleja antecesora de los organismos que constituyeron la “explosión cámbrica” fue un avance notable en el entendimiento de la evolución de la vida en nuestro planeta (ej. Briggs, 2015). Tal vez la característica más notable de los fósiles ediacaranos sea la carencia (con muy contadas excepciones) de exoesqueletos fosilizados. Particularmente en el Ediacarano tardío (580-541 Ma) se desarrollaron biotas complejas y variadas de organismos multicelulares que han sido clasificadas y han permitido definir tres asociaciones sucesivas. Éstas son: la Asociación Avalon (ca. 572-560 Ma), la Asociación del Mar Blanco (“White Sea”, ca. 560-550 Ma) y la Asociación Nama (ca. 550-541 Ma). Las distintas asociaciones están constituidas por ciertos macrofósiles característicos. Pocos de estos fósiles aparecen en más de una asociación (Xiao y Narbonne, 2020). La Asociación del Mar Blanco presenta la mayor variedad de fósiles ediacaranos, siendo las otras dos significativamente más pobres en variedad de macrofósiles. La reconstrucción y asignación de estos registros fósiles a determinados phylas es muy problemático, y ninguno de ellos sobrevivió al límite con el Cámbrico.

La Glaciación Gaskiers y la Excursión Shuram

Si bien el conocimiento de los macrofósiles ediacaranos es aún incompleto, la evidencia existente indica que estas biotas complejas se desarrollaron en el Ediacarano tardío (véase sin embargo el reciente hallazgo de Liu y Tindal, 2021). En particular, después de ocurrido un evento glaciario muy importante, conocido como Glaciación Gaskiers (ej. Retallack, 2013). A diferencia de la glaciación Marinoan, ya mencionada, la Gaskiers no correspondería a un evento que abarcó todo el globo, ya que su duración habría sido demasiado breve para convertirse en un evento de "Snowball Earth". Ha sido datada con precisión en 580 Ma y su duración habría sido inferior a 1 millón de años (Pu et al., 2016). Este evento glaciario, sin embargo, habría tenido importantes consecuencias ambientales y ha sido definido como el límite entre el Ediacarano Inferior y el Superior (Xiao y Narbonne, 2020).

Otro evento sobresaliente en el Ediacarano tardío es la presencia de la mayor excursión isotópica de carbono conocida en el registro geológico. Esta excursión, conocida como Shuram (Grotzinger et al., 2011), registró una anomalía isotópica negativa de $\delta^{13}\text{C}$ de hasta -12‰. Este evento ha sido observado en diferentes localidades a nivel global y recientes estudios astrocronológicos (Gong y Li, 2020) lo han datado entre 570 y 562 Ma. El desarrollo de la excursión es también muy particular, con una caída muy rápida que habría alcanzado el nadir un millón de años después de su inicio y una recuperación mucho más lenta de 6 a 7 millones de años de duración. El origen de este evento único y su correlación con la aparición de la primera asociación de macrobiotas ediacaranas de organismos multicelulares complejos y diversos, no está claramente comprendido aún (McMenamin, 2018). Un modelo que se ha visto favorecido recientemente (véase Li et al., 2020, por ejemplo) propone que la excursión corresponde a un gran evento global de oxigenación de los océanos profundos, que habría sido la última fase de oxigenación oceánica en la evolución de nuestro planeta (Fike et al., 2006).

La Paleogeografía del Ediacarano

Los conocimientos sobre la evolución paleogeográfica global a lo largo del Precámbrico son todavía muy fragmentarios e incompletos (ej. Pesonen et al., 2021). A pesar de muchas incertidumbres, hay un amplio consenso en que hacia el inicio del Neoproterozoico (1000 Ma) se produjo la formación de un supercontinente, conocido como Rodinia (McMenamin y McMenamin, 1990; Hoffman, 1991). En la mayoría de las reconstrucciones paleogeográficas del Neoproterozoico temprano, Rodinia es ubicado en latitudes ecuatoriales, con Laurentia en una posición central, rodeado de la mayoría o totalidad de los restantes cratones (ej. Li et al., 2008, Figura 1). Se ha publicado en las últimas dos décadas una amplia gama de modelos paleogeográficos que buscan reconstruir con alguna certeza la geometría, cinemática y cronología del proceso de fracturación y desmembramiento de este supercontinente (ej. Meert y Torsvik, 2003; Kheraskova et al., 2010; Zhao et al., 2018, etc.), no existiendo aún un modelo detallado del mismo que haya alcanzado un razonable consenso. A pesar de ello, para la mayoría de los investigadores, a comienzos del Ediacarano Rodinia ya había desaparecido o estaba en las etapas finales de su desmembramiento (ej. Li et al., 2013, Cawood et al., 2016). También existe consenso en que el continente de Gondwana se formó fundamentalmente durante el Ediacarano (ej. Meert y Liberman, 2008; Rapalini, 2018), aunque los últimos procesos de acreción podrían haber ocurrido en el Cámbrico (Trindade et al., 2006; Tohver et al., 2010). Pero se podría argumentar que ahí terminan los acuerdos. En las últimas décadas, diferentes y muy variados modelos tectónicos y paleogeográficos han sido propuestos y discutidos.

Powell (1995) propuso el nombre de Pannotia para un hipotético supercontinente que habría existido durante el Ediacarano tardío e inicios del Cámbrico. Entre las particularidades de Pannotia

se destaca su breve duración, pocas decenas de millones de años, ya que se habría fragmentado rápidamente para formar los principales continentes paleozoicos (ej. Gondwana, Laurentia, Báltica, Siberia). Esta propuesta ha sido fervientemente discutida, y si bien no cuenta en la actualidad con mucha aceptación, los debates sobre la posibilidad o imposibilidad de su existencia continúan (véase como ejemplos Evans, 2021 y Murphy et al., 2021).

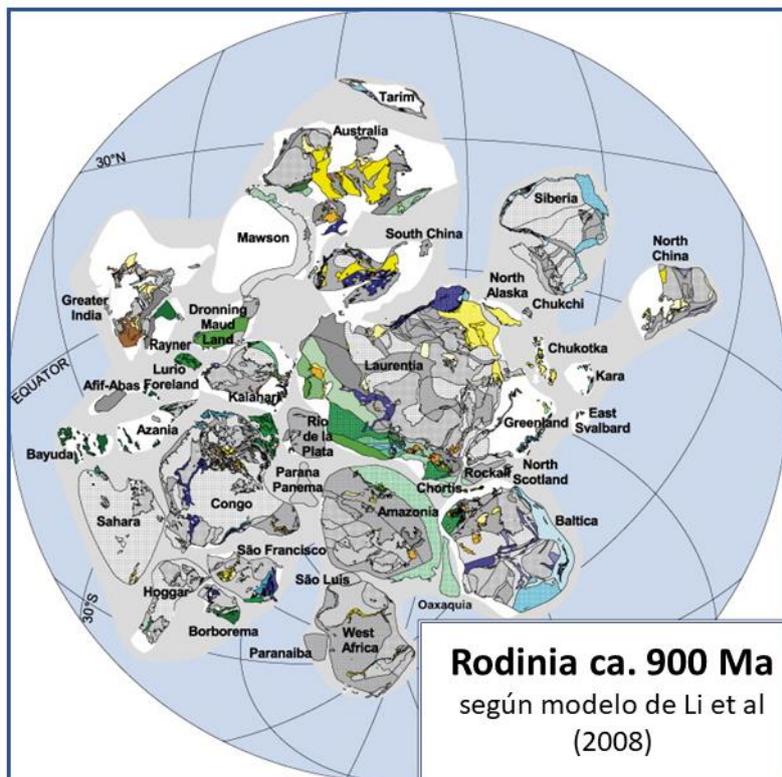


Figura 1. Modelo de reconstrucción de Rodinia propuesto por Li et al. (2008) para alrededor de los 900 Ma (modificado de Li et al., 2008)

En las reconstrucciones paleogeográficas del Ediacarano y Cámbrico, los datos paleomagnéticos cumplen un rol fundamental. Varios modelos e hipótesis han surgido a partir de nueva información paleomagnética o han sido validados o invalidados por estos datos. Symons y Chiasson (1991) y Meert y Van der Voo (1994) fueron de los primeros en señalar que la curva de deriva polar aparente (CDPA) de Laurentia para el Ediacarano tenía rasgos muy particulares. Según la misma, Laurentia habría migrado desde latitudes tropicales en el Ediacarano temprano (ca. 615 Ma) hasta latitudes polares hacia los 590-570 Ma, para regresar a latitudes ecuatoriales en un lapso muy breve (ca. 560 Ma). Esta posible ida y vuelta en la deriva de Laurentia (véase McCausland et al., 2007) despertó una gran polémica y diferentes propuestas, desde la invalidación de la información paleomagnética que indica posiciones de alta latitud (ej. Bono y Tarduno, 2015), a un campo magnético dipolar con los polos en posiciones ecuatoriales (Abrajevitch y Van der Voo, 2010, véase próximo apartado), velocidades de deriva continental extremas (Mc Causland et al., 2007) o desplazamiento polar verdadero por intercambio de ejes de inercia (IITPW, Kirschvink et al., 1997; Robert et al., 2017). En particular, estos últimos autores han propuesto la existencia de dos eventos de IITPW en el Ediacarano, uno entre aproximadamente 610 y 590 Ma y otro entre ca. 575 y 565 Ma. Según Robert et al. (2018) las CDPA de Laurentia, Báltica y África Occidental presentan evidencias notorias de estos rápidos desplazamientos de casi 90° del manto y la corteza terrestres respecto al eje de rotación. Esta hipótesis aguarda la obtención de un mayor número de polos paleomagnéticos de calidad de los intervalos mencionados en otros cratones para ser validada (o invalidada).

El campo magnético en el Ediacarano

La paradoja de los polos paleomagnéticos del Ediacarano “medio” de Laurentia, comentado más arriba, llevó a Abrajévitch y Van der Voo (2010) a proponer que durante ese lapso el campo magnético terrestre tuvo una configuración “exótica”. Esta habría consistido en un campo dipolar estable, al menos por cientos de miles o unos pocos millones de años, con los polos geomagnéticos ubicados en el ecuador. De este modo la aparente migración de Laurentia (y otros continentes) a latitudes polares no sería otra cosa que la ubicación de estos polos geomagnéticos exóticos en posiciones ecuatoriales. Si bien la rotación terrestre ha sido siempre considerada como un factor fundamental en la configuración dipolar y axial del campo magnético (Merrill et al., 1998), algunos modelos numéricos de dínamos en esferas en rotación han producido campos dipolares ecuatoriales con cierta estabilidad bajo condiciones específicas (Aubert y Wicht, 2004).

Por su parte, hacia finales del Ediacarano (555-540 Ma, Bazhenov et al., 2016), el campo magnético terrestre habría tenido un comportamiento “hiperactivo” expresado por una tasa de reversiones de polaridad extremadamente alta. Se ha calculado que podrían haber ocurrido del orden de 20 reversiones de polaridad por millón de años (Levashova et al., 2021), transformándola, posiblemente, en la tasa más alta de reversiones conocida (Figura 2). Esta hiperactividad de reversiones se habría extendido al Cámbrico Inferior (Duan et al., 2018). A pesar de esa hiperactividad el campo magnético terrestre habría mantenido su carácter dipolar (Bazhenov et al., 2016).

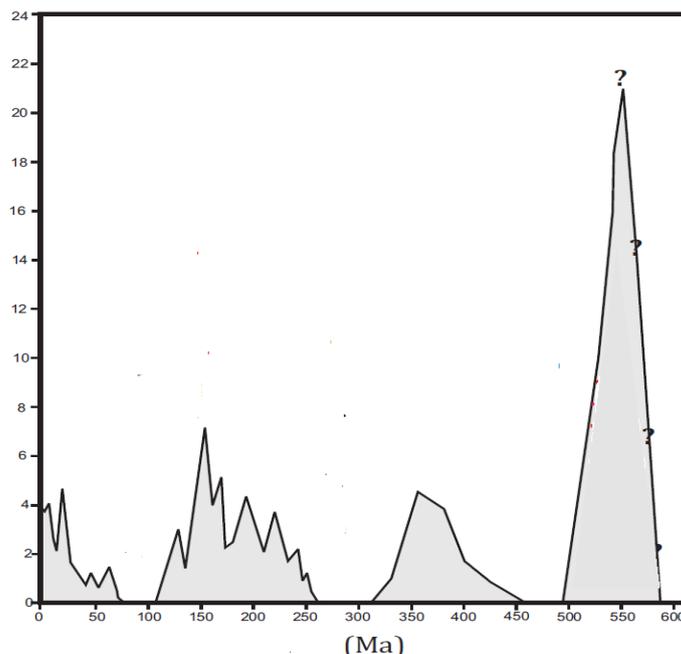


Figura 2. Estimación de la frecuencia de reversiones de polaridad del campo magnético terrestre en los últimos 600 millones de años. En ordenadas el número de reversiones por millón de años. Nótese la altísima tasa de reversiones para el Ediacarano tardío y Cámbrico. Modificado de Meert et al. (2016).

El comportamiento particular del campo magnético ediacarano se extendería también a su intensidad. Según una serie de estudios recientes de paleointensidades absolutas (véase Thallner et al., 2021 y referencias ahí citadas), el campo magnético terrestre habría alcanzado su mínima intensidad en el Ediacarano. La misma, que implicaría un orden de magnitud menor a la actual, habría durado varias decenas de millones de años, entre los 600 y 560 Ma, aproximadamente, con una probable y lenta recuperación de la paleointensidad hacia fines del Ediacarano y comienzos del Cámbrico. Esta recuperación se habría prolongado durante el Paleozoico

temprano. Esta debilidad del paleocampo magnético puede ser interpretada como una causa factible de un comportamiento direccional y/o configuración anómala del mismo. Sin embargo, datos paleomagnéticos de diferentes continentes para el intervalo aproximado de 590-565 Ma indican que el campo habría sido dipolar con reversiones de polaridad relativamente frecuentes (Symons y Chiasson, 1990, Meert y Van der Voo, 1994, Moloto-A-Kenguemba et al., 2008, Rapalini et al., 2015).

Un conocimiento más robusto de las diferentes características del campo magnético en el Ediacarano puede tener implicancias muy relevantes para la evolución de nuestro planeta. En la última década, aproximadamente, muchos modelos termodinámicos han propuesto que el núcleo interno de la Tierra sería relativamente joven (ej. Aubert et al., 2009, Landeau et al., 2017). En estos modelos, la geodínamo habría tenido dos etapas diferentes. Una primera etapa en que la convección fue de origen exclusivamente térmico, y que debería haber presentado un régimen de energía declinante hasta que se alcanzaran las condiciones para el comienzo de la cristalización del núcleo interno. A partir del cual, el régimen convectivo se habría hecho progresivamente más vigoroso por la producción de calor latente de cristalización y por la convección composicional debida a la liberación de elementos livianos durante la solidificación del núcleo (Merril et al., 1998). Los escasos datos robustos de paleointensidades absolutas del Precámbrico (Lloyd et al., 2021) serían consistentes con una tendencia al decrecimiento de la intensidad del campo magnético terrestre durante el Neoproterozoico hasta el mínimo ediacarano. Éstos han sido indicados como posibles evidencias de la edad joven del núcleo interno. Sin embargo, recientes estudios experimentales sobre la conductividad térmica de aleaciones de hierro con elementos livianos a presiones y temperaturas del interior terrestre profundo (ej. Konôpková et al., 2016, Basu et al., 2020) sugieren que el núcleo interno podría tener una edad de entre 2000 y 4000 Ma.

De los párrafos anteriores se puede inferir que el Ediacarano es un período crucial en la historia física, geológica, ambiental y biológica de nuestro planeta y cuyos misterios y rarezas están siendo revelados con dificultad y lentitud.

A continuación, presento de manera suscita algunos avances que hemos realizado en el conocimiento de varios de los aspectos mencionados a partir de nuestros estudios en los registros ediacaranos del cratón del Río de la Plata.

Avances en el Ediacarano del cratón del Río de la Plata

En las últimas dos décadas, el avance en el conocimiento de múltiples aspectos del registro ediacarano del cratón del Río de la Plata ha sido manifiesto. Estos avances han incluido aspectos estratigráficos, geocronológicos, paleontológicos, paleoambientales y paleogeográficos.

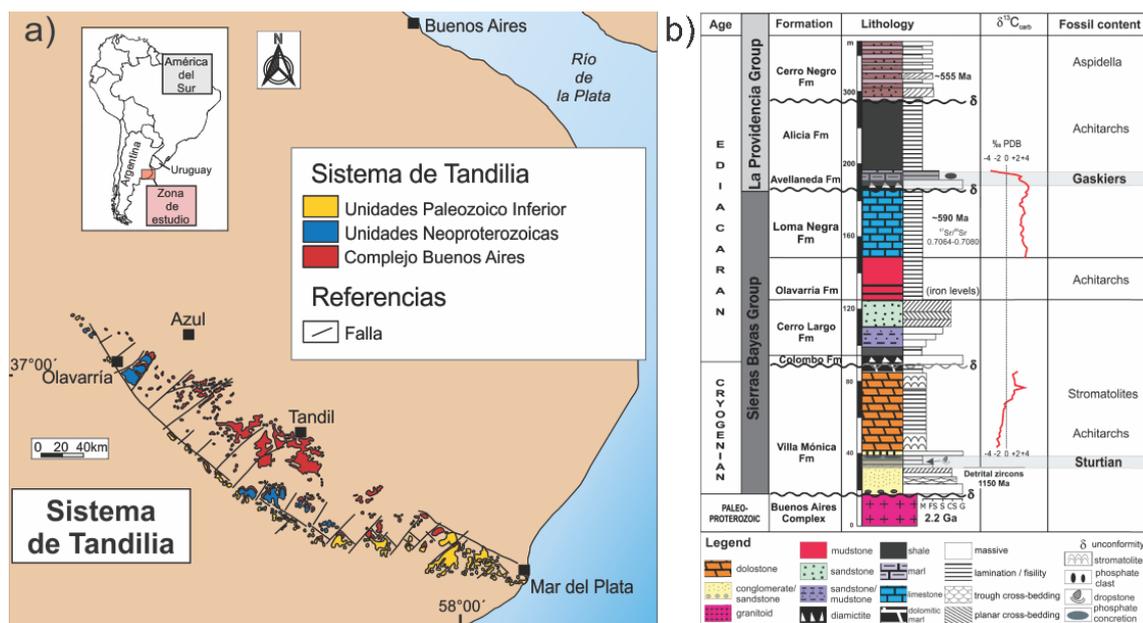


Figura 3. A) mapa geológico simplificado del Sistema de Tandilia (tomado de Franceschinis, 2019 y modificado de Cingolani, 2011). B) Columna estratigráfica de la cobertura neoproterozoica del Sistema de Tandilia (extraído de Gómez Peral et al., 2018)

En particular, se ha refinado notoriamente la estratigrafía de la cobertura sedimentaria neoproterozoica del sistema de Tandilia (Figura3), en la provincia de Buenos Aires, merced al trabajo sistemático realizado por el grupo del CIG-Universidad Nacional de La Plata dirigido por el Dr. Daniel Poiré y colaboradores (ej. Gómez Peral et al., 2007, 2019, Arrouy et al., 2015, 2017 y referencias ahí citadas). El esquema estratigráfico actual aceptado para esta cobertura, sin metamorfismo y con escasa deformación, es la subdivisión en los Grupos Sierras Bayas y La Providencia (Figura 3B). El primero incluiría las Formaciones Villa Mónica (dolomías y cuarcitas) de probable edad criogeniana, Colombo (diamictitas asignadas al Ediacarano temprano), Cerro Largo (pelitas y cuarcitas del Ediacarano temprano), Olavarría (pelitas y areniscas de fines del Ediacarano temprano) y Loma Negra (calizas del tope del Ediacarano temprano, ca. 580 Ma). El Grupo La Providencia está constituido por las Formaciones Avellaneda (margas y pelitas del Ediacarano tardío temprano, ca. 570 Ma), Alicia (limolitas y areniscas de ca. 565-560 Ma) y Cerro Negro (areniscas y pelitas de ca. 560-550 Ma). De este modo, la cobertura neoproterozoica de Tandilia tendría un registro casi completo del Ediacarano tardío y de parte del Ediacarano temprano.

Entre los hallazgos más notables y espectaculares recientes en la cobertura sedimentaria de Tandilia están los microfósiles discoidales ediacaranos (Arrouy et al., 2016) encontrados en la Formación Cerro Negro, la unidad cuspidal de la sucesión (Figura4). Estas formas han sido tentativamente asignadas al género *Aspidella* y atribuidas con mayor probabilidad a la Asociación del Mar Blanco (White Sea), sugiriendo una edad entre 560 y 550 Ma para los niveles superiores de esta formación.



Figura 4. imágenes de algunos de los fósiles edicaranos hallados en la Formación Cerro Negro (extraído de Arrouy et al., 2016)

Gómez Peral et al. (2018) reportaron en las margas de la Formación Avellaneda, base del Grupo La Providencia, una anomalía negativa de $\delta^{13}\text{C}$ de hasta -6‰ en pocos metros de esta unidad. El registro se trunca a esos valores. Los autores interpretaron esta excursión como un registro parcial de cambios ambientales pos-glaciares, posteriores a la glaciación Gaskiers. Nuevas determinaciones realizadas en el marco de la colaboración con los grupos de La Plata y Sao Paulo (Figura 5), han confirmado la existencia de esa abrupta excursión hacia valores negativos de $\delta^{13}\text{C}$ (Afonso et al., 2019, 2020). A la fecha se consideran dos posibles interpretaciones: la original de Gómez Peral et al. (2018) y la posibilidad de que corresponda al inicio de la excursión Shuram. En este último caso se podrían datar los niveles superiores de la Formación Avellaneda en 570 Ma.

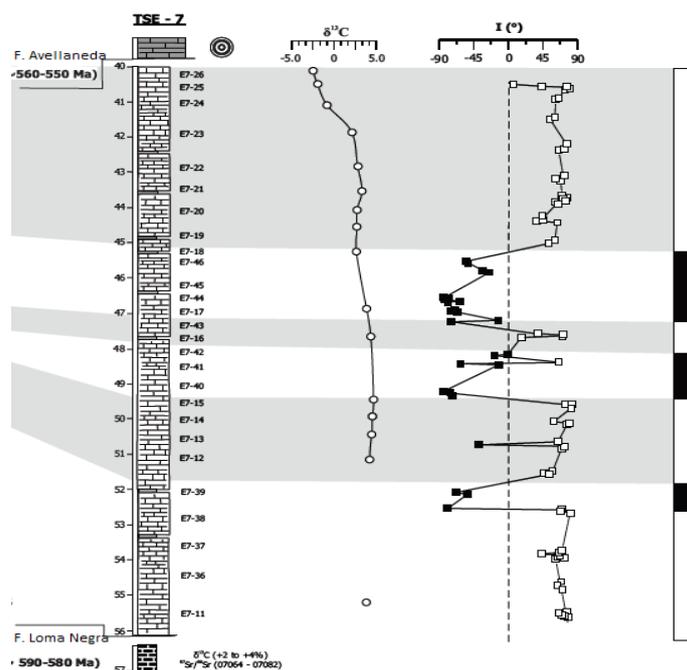


Figura 5. Magnetoestratigrafía preliminar de un testigo corona de la Formación Avellaneda en la localidad de Olavarría. Tomado de Afonso et al. (2019). El espesor está indicado en metros. Los números a la derecha de la columna refieren a las muestras paleomagnéticas estudiadas. Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ fueron obtenidos sobre las mismas muestras. Nótese el inicio de una excursión abrupta hacia valores negativos en los términos cuspidales de la columna. I: inclinación magnética. En el extremo de la derecha se representa la columna magnetoestratigráfica local preliminar; intervalos negros (blancos) corresponden a polaridad normal (reversa). Extraído de Afonso et al. (2020).

Resultados magnetoestratigráficos preliminares sobre la Formación Avellaneda (Afonso et al., 2019, 2020), obtenidos en coronas de pozo, han demostrado que durante la depositación de esta unidad se habrían sucedido siete intervalos de polaridad del campo magnético terrestre (Figura4), sugiriendo una alta tasa de reversiones. El inicio de la excursión de $\delta^{13}\text{C}$ en la Formación Avellaneda habría ocurrido durante un intervalo reverso del campo magnético, coincidente con lo determinado para la excursión Shuram, entre su inicio y el nadir en el valor de la anomalía (Minguez y Kodama, 2017). Esto es consistente con la posibilidad de que tengamos el registro del inicio de la excursión isotópica Shuram en la parte superior de la Formación Avellaneda.

En los últimos 20 años, trabajos en colaboración con colegas de Uruguay, La Plata y Sao Paulo han permitido obtener varios polos paleomagnéticos ediacaranos para el cratón del Río de la Plata (véase Rapalini et al., 2021). Estos resultados han llevado a construir un trazado preliminar de la CDPA del cratón para el intervalo aproximado entre 600 y 550 Ma (Figura6). Esta curva sugiere una rápida deriva polar que involucró una migración hacia latitudes más australes y una rotación antihoraria de ca. 150° .

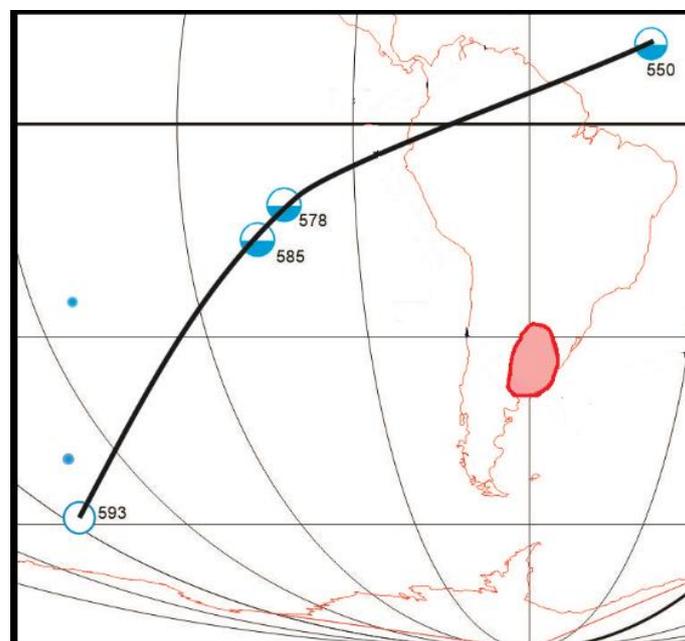


Figura 6. Curva de desplazamiento polar ediacarana para el cratón del Río de la Plata, según Rapalini et al. (2021). Los números indican la edad más probable de las posiciones polares. Símbolos abiertos (cerrados, mixtos) indican polaridades reversas (normales, mixtas). Los símbolos pequeños son polos paleomagnéticos de menor confianza que los mayores (polos de referencia). En rojo, la extensión aproximada del cratón. Modificado de Rapalini et al. (2021).

Estos movimientos habrían tenido lugar durante las etapas finales de formación del Gondwana Occidental (Rapalini, 2018). La comparación de la posición de dos polos paleomagnéticos de alta calidad del cratón, de edades comprendidas entre 585 y 575 Ma (Rapalini, 2006, Rapalini et al., 2015) con otros aproximadamente coetáneos del cratón del Congo (Moloto-A-Kenguemba et al., 2008) y uno reciente de Africa Occidental (Robert et al., 2017) sugiere que los tres cratones se encontraban cercanos o ya unidos hacia los 575 Ma (Figura7). Rapalini et al. (2015) avalaron, en base a los datos paleomagnéticos disponibles, la existencia de un gran océano Clymene a fines del Ediacarano Inferior, entre el cratón de Amazonia (y África Occidental) y los cratones de Congo-Sao Francisco y Río de la Plata. Sin embargo, la coincidencia en los polos ilustrados en la Figura 7 sugiere que, de existir todavía, Clymene habría sido mucho más estrecho y reducido a fines del Ediacarano temprano.

Muy recientemente, Franceschinis (2019) y Franceschinis et al. (2019) han aportado un polo paleomagnético preliminar para la Formación Avellaneda, basado en muestras de afloramientos y testigos de pozo. Este polo preliminar indica latitudes altas para el cratón hacia los 570 Ma, cercanas a los 50°S, coherentes con la depositación de esta unidad tras la finalización de la Glaciación Gaskiers (Poiré et al., 2018). La comparación con los polos ligeramente más antiguos de Sierra de las Animas (Rapalini et al., 2015) y Los Barrientos (Rapalini, 2006) de ca. 585-575 Ma, sugiere un desplazamiento polar aparente extraordinariamente rápido, principalmente por una rotación antihoraria, que podría haber superado los 60° (Figura 8). El mismo es aproximadamente coetáneo y en el mismo sentido que el hipotético IITPW propuesto por Robert et al. (2018), sugiriendo que si bien no se alcanzarían los 90° de desplazamiento podría obedecer al mismo proceso.

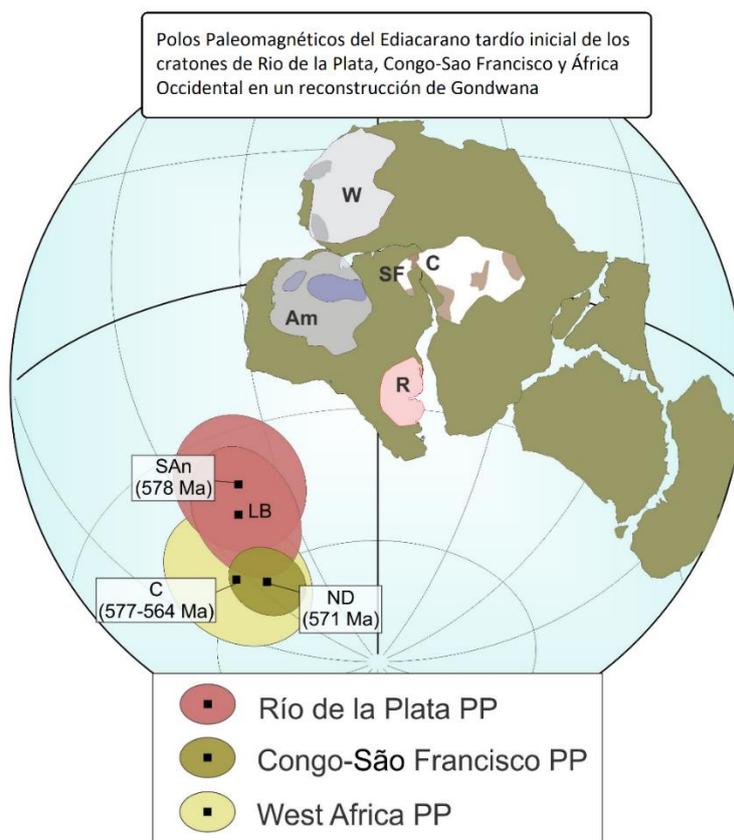


Figura 7. Polos paleomagnéticos de referencia de los cratones de Río de la Plata, Congo-Sao Francisco y África Occidental para inicios del Ediacarano tardío (580-570 Ma, aproximadamente) en una reconstrucción del Gondwana. Nótese la consistencia en la posición de los polos de los tres cratones sugiriendo que la ubicación relativa de los tres en la figura es permisible paleomagnéticamente y estaban ya muy próximos o acrecionados. LB: Los Barrientos (Rapalini, 2006), San (Sierra de Ánimas, Rapalini et al., 2015), ND: diques Nola (Moloto-A-Kenguemba, 2008), C: Adrar-n-Takoucht (Robert et al., 2017). Tomado de Rapalini et al. (2021)

La finalización de estos estudios en marcha, así como estudios paleomagnéticos sistemáticos acompañados de determinaciones geocronológicas precisas en diferentes unidades ediacaranas del cratón, tanto en Argentina como en Uruguay, aportarán nuevas restricciones a los modelos e hipótesis en discusión. Probablemente también abrirán nuevos interrogantes.

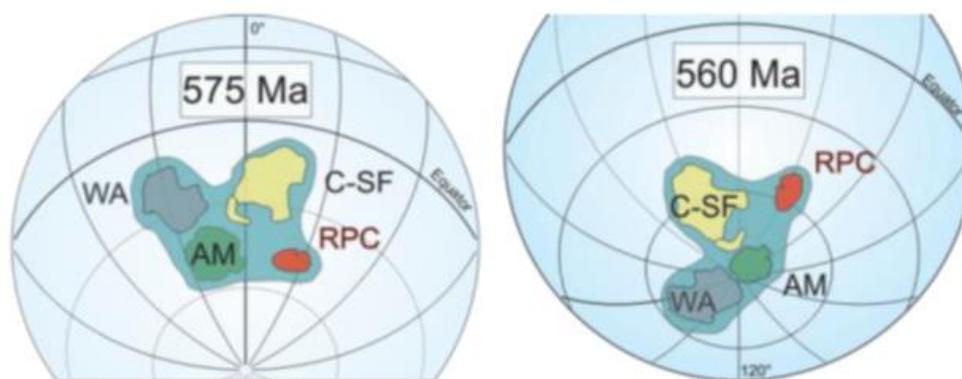


Figura 8. Reconstrucciones paleogeográficas propuestas para el Ediacarano “medio” (ca. 575 Ma) y tardío (ca. 560 Ma) para los cratones de Río de la Plata (RPC), Congo-Sao Francisco (C-SF), África Occidental (WA) y Amazonia (AM). Nótese la rotación mayúscula de los cratones en un lapso breve de tiempo geológico. Modificado de Franceschinis et al. (2021)

CONCLUSIONES

El Ediacarano (635-541 Ma) es tal vez el período de la historia geológica más misterioso y lleno de interrogantes. Probablemente, también sea el más apasionante. Los sucesos ocurridos en ese lapso cambiaron definitivamente y de manera radical la evolución de la Tierra. Durante el Ediacarano se desarrollaron formas de vida multicelulares complejas y diversas, muchas de cuyas características son aún desconocidas. Estas biotas, aparentemente, no tuvieron descendencia en el Fanerozoico. Cambios ambientales mayúsculos, como la última etapa de oxigenación de los océanos a escala global habría sido coetánea de la formación del megacontinente de Gondwana. Estos sucesos aparentemente habrían ocurrido mientras el campo magnético era extraordinariamente débil, aunque aún dipolar y con una frecuencia de reversiones de polaridad muy alta. En primera instancia, estas características serían compatibles con el comienzo de cristalización del núcleo interno durante el Ediacarano. Es posible que el planeta haya sufrido dos eventos de deriva polar verdadera de cerca de 90° en el Ediacarano temprano y medio, respectivamente, aunque esta interpretación podría no ser necesaria si se acepta que el campo magnético tuvo un período exótico, con una geometría dipolar estable, pero con los polos geomagnéticos ubicados cerca del ecuador terrestre en lugar de los polos geográficos.

Muchos misterios y rarezas del Ediacarano quedan por ser confirmados o descartados y muy probablemente muchos otros están aún escondidos en las sucesiones geológicas de esa edad en todo el globo.

Agradacimientos

Hace aproximadamente 25 años iniciamos con Leda Sánchez Bettucci, de la Universidad de la República (Uruguay), los primeros estudios paleomagnéticos en unidades ediacaranas del cratón del Río de la Plata. La colaboración con ella sigue tan activa como al inicio. Una parte importante de los avances reseñados de modo muy sucinto no se hubieran logrado sin la colaboración activa y abierta de Daniel Poiré (CIG-Universidad Nacional de La Plata) y sus discípulas María Julia Arrouy (IHLLA, UNCPBA) y Lucía Gómez Peral (CIG-UNLP). Los estudios se enriquecieron enormemente con la colaboración total de Ricardo Trindade, director del Laboratorio de Paleomagnetismo del IAG (Universidad de Sao Paulo) y recientemente con la participación de Jhon Afonso, tesista doctoral en esa institución. La participación de Eric Tohver (en ese momento en la USP) fue muy importante aportando dataciones radimétricas de alta precisión. Afortunadamente, la colaboración entre los tres grupos es cada vez más activa y con la participación de más investigadores jóvenes o en formación. Una parte sustancial de los avances en el último lustro han sido debidos al incansable trabajo y curiosidad de Pablo Franceschinis

(IGEBA-UBA) quien continúa llevando adelante buena parte de los estudios paleomagnéticos. Andrés Cukjati se sumó recientemente a estos estudios. Durante muchos años el apoyo técnico y profesional de Carlos A. Vásquez y Horacio Lippai fue esencial para desarrollar muchas de las tareas de campo y laboratorio. Las empresas Loma Negra y Cementos Avellaneda gentilmente permitieron trabajar en sus instalaciones. CONICET, la Universidad de Buenos Aires, la Agencia de Promoción Científica y Técnica de Argentina y FAPESP proveyeron apoyo económico para las investigaciones a lo largo de más de dos décadas. El trabajo continúa.

BIBLIOGRAFÍA

- Abrajevitch, A., & Van der Voo, R. (2010). Incompatible Ediacaran paleomagnetic directions suggest an equatorial geomagnetic dipole hypothesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 293(1-2), 164-170.
- Afonso, J., Franceschinis, P., Rapalini, A., Arrouy, M. J., Poiré, D., & Trindade, R. I. F. (2019) Middle to Late Ediacaran Magnetostratigraphy of the Avellaneda Formation, Rio de La Plata Craton. *Latinmag Letters*, 9, Special Issue, B09-O, 1-6.
- Afonso, J., Trindade, R., Franceschinis, P., & Rapalini, A. (2020). Magnetostratigraphy and Carbon isotopes of Ediacaran Avellaneda Formation, Rio de La Plata Craton, Argentina. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 1162).
- Arrouy, M.J., Poiré, D., Gómez Peral, L.E., Canalicchio, J.M., 2015. Sedimentología y estratigrafía del grupo La Providencia (nom. nov.): cubierta superior neoproterozoica, Sistema de Tandilia, Argentina. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*. 22, 2, 171–189
- Arrouy, M. J., Warren, L. V., Quaglio, F., Poiré, D. G., Simões, M. G., Rosa, M. B., & Peral, L. E. G. (2016). Ediacaran discs from South America: probable soft-bodied macrofossils unlock the paleogeography of the Clymene Ocean. *Scientific Reports*, 6(1), 1-10.
- Aubert, J., & Wicht, J. (2004). Axial vs. equatorial dipolar dynamo models with implications for planetary magnetic fields. *Earth and Planetary Science Letters*, 221(1-4), 409-419.
- Aubert, J., Labrosse, S., & Poitou, C. (2009). Modelling the palaeo-evolution of the geodynamo. *Geophysical Journal International*, 179(3), 1414-1428.
- Basu, A., Field, M. R., McCulloch, D. G., & Boehler, R. (2020). New measurement of melting and thermal conductivity of iron close to outer core conditions. *Geoscience Frontiers*, 11(2), 565-568.
- Bazhenov, M. L., Levashova, N. M., Meert, J. G., Golovanova, I. V., Danukalov, K. N., & Fedorova, N. M. (2016). Late Ediacaran magnetostratigraphy of Baltica: evidence for magnetic field hyperactivity?. *Earth and Planetary Science Letters*, 435, 124-135.
- Bono, R. K., & Tarduno, J. A. (2015). A stable Ediacaran Earth recorded by single silicate crystals of the ca. 565 Ma Sept-Îles intrusion. *Geology*, 43(2), 131-134.
- Briggs, D. E. (2015). The cambrian explosion. *Current Biology*, 25(19), R864-R868.
- Cawood, P. A., Strachan, R. A., Pisarevsky, S. A., Gladkochub, D. P., & Murphy, J. B. (2016). Linking collisional and accretionary orogens during Rodinia assembly and breakup: Implications for models of supercontinent cycles. *Earth and Planetary Science Letters*, 449, 118-126.
- Cingolani, C. A. (2011). The Tandilia System of Argentina as a southern extension of the Río de la Plata craton: an overview. *International Journal of Earth Sciences*, 100(2), 221-242.
- Duan, Z., Liu, Q., Ren, S., Li, L., Deng, X., & Liu, J. (2018). Magnetic reversal frequency in the Lower Cambrian Niutitang Formation, Hunan Province, South China. *Geophysical Journal International*, 214(2), 1301-1312.
- Evans, D. A. (2021). Pannotia under prosecution. *Geological Society, London, Special Publications*, 503(1), 63-81.

- Fike, D. A., Grotzinger, J. P., Pratt, L. M., & Summons, R. E. (2006). Oxidation of the Ediacaran Ocean. *Nature*, 444(7120), 744-747.
- Franceschinis, P.R. (2019). Evolución paleogeográfica del cratón del Río de la Plata en el Precámbrico y su relación con el terreno Pampia en el Cámbrico. Universidad de Buenos Aires, Tesis Doctoral, inédita. 357 pp.
- Franceschinis, P.R., Afonso, J., Arouy, M.J., Gómez Peral, L., Poiré, D.G., Trindade, R.I.F & Rapalini, A.E. (2021). Paleogeography of the Río de la Plata craton in the Ediacaran: paleomagnetic poles for the Avellaneda and Cerro Negro Formations, Tandilia System, Argentina. *Precambrian Research*, enviado.
- Gómez Peral, L. E., Poiré, D. G., Strauss, H., & Zimmermann, U. (2007). Chemostratigraphy and diagenetic constraints on Neoproterozoic carbonate successions from the Sierras Bayas Group, Tandilia System, Argentina. *Chemical Geology*, 237(1-2), 109-128.
- Gómez-Peral, L. E., Kaufman, A. J., Arrouy, M. J., Richiano, S., Sial, A. N., Poiré, D. G., & Ferreira, V. P. (2018). Preglacial palaeoenvironmental evolution of the ediacaran loma Negra formation, far southwestern gondwana, Argentina. *Precambrian Research*, 315, 120-137.
- Gradstein, F. M., Ogg, J. G., Schmitz, M. D., & Ogg, G. M. (Eds.). (2020). *Geologic Time Scale 2020*. Elsevier.
- Grotzinger, J. P., Fike, D. A., & Fischer, W. W. (2011). Enigmatic origin of the largest-known carbon isotope excursion in Earth's history. *Nature Geoscience*, 4(5), 285-292.
- Hoffman, P. F. (1991). Did the breakout of Laurentia turn Gondwanaland inside-out?. *Science*, 252(5011), 1409-1412.
- Hoffman, P. F., Kaufman, A. J., Halverson, G. P., & Schrag, D. P. (1998). A Neoproterozoic snowball earth. *Science*, 281(5381), 1342-1346.
- Hsieh, W. P., Goncharov, A. F., Labrosse, S., Holtgrewe, N., Lobanov, S. S., Chuvashova, I. & Lin, J. F. (2020). Low thermal conductivity of iron-silicon alloys at Earth's core conditions with implications for the geodynamo. *Nature communications*, 11(1), 1-7.
- Kheraskova, T. N., Bush, V. A., Didenko, A. N., & Samygin, S. G. (2010). Breakup of Rodinia and early stages of evolution of the Paleasian ocean. *Geotectonics*, 44(1), 3-24.
- Kirschvink, J. L., Ripperdan, R. L., & Evans, D. A. (1997). Evidence for a large-scale reorganization of Early Cambrian continental masses by inertial interchange true polar wander. *Science*, 277(5325), 541-545.
- Konôpková, Z., McWilliams, R. S., Gómez-Pérez, N., & Goncharov, A. F. (2016). Direct measurement of thermal conductivity in solid iron at planetary core conditions. *Nature*, 534(7605), 99-101.
- Landeau, M., Aubert, J., & Olson, P. (2017). The signature of inner-core nucleation on the geodynamo. *Earth and Planetary Science Letters*, 465, 193-204.
- Levashova, N. M., Golovanova, I. V., Rudko, D. V., Danukalov, K. N., Rudko, S. V., Salmanova, R. Y., & Meert, J. G. (2021). Late Ediacaran magnetic field hyperactivity: Quantifying the reversal frequency in the Zigan Formation, Southern Urals, Russia. *Gondwana Research*, 94, 133-142.
- Li, Z. X., Bogdanova, S., Collins, A. S., Davidson, A., De Waele, B., Ernst, R. E., ... & Vernikovskiy, V. (2008). Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis. *Precambrian research*, 160(1-2), 179-210.
- Li, Z., Cao, M., Loyd, S. J., Algeo, T. J., Zhao, H., Wang, X., ... & Chen, Z. Q. (2020). Transient and stepwise ocean oxygenation during the late Ediacaran Shuram Excursion: Insights from carbonate $\delta^{238}\text{U}$ of northwestern Mexico. *Precambrian Research*, 344, 105741.
- Li, Z. X., Evans, D. A., & Halverson, G. P. (2013). Neoproterozoic glaciations in a revised global palaeogeography from the breakup of Rodinia to the assembly of Gondwanaland. *Sedimentary Geology*, 294, 219-232.

- Liu, A. G., & Tindal, B. H. (2021). Ediacaran macrofossils prior to the ~ 580 Ma Gaskiers glaciation in Newfoundland, Canada. *Lethaia*, 54(2), 260-270.
- Marshall, C. R. (2006). Explaining the Cambrian “explosion” of animals. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 34, 355-384.
- McCausland, P. J., Van der Voo, R., & Hall, C. M. (2007). Circum-lapetus paleogeography of the Precambrian–Cambrian transition with a new paleomagnetic constraint from Laurentia. *Precambrian Research*, 156(3-4), 125-152.
- McMenamin, M. A. (2018). *Deep time analysis: A coherent view of the history of life*. Springer. 273 pp.
- McMenamin, M.A.S. & McMenamin, D.L.S. (1990). *The emergence of animals: The Cambrian breakthrough*. Columbia University Press, New York. 217 pp
- Meert, J. G., & Lieberman, B. S. (2008). The Neoproterozoic assembly of Gondwana and its relationship to the Ediacaran–Cambrian radiation. *Gondwana research*, 14(1-2), 5-21.
- Meert, J. G., & Torsvik, T. H. (2003). The making and unmaking of a supercontinent: Rodinia revisited. *Tectonophysics*, 375(1-4), 261-288.
- Meert, J. G., Van der Voo, R., & Payne, T. W. (1994). Paleomagnetism of the Catoclin volcanic province: A new Vendian-Cambrian apparent polar wander path for North America. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B3), 4625-4641.
- Meert, J. G., Levashova, N. M., Bazhenov, M. L., & Landing, E. (2016). Rapid changes of magnetic field polarity in the late Ediacaran: linking the Cambrian evolutionary radiation and increased UV-B radiation. *Gondwana Research*, 34, 149-157.
- Merrill, R.T., McElhinny, M.W., McFadden, P.L. (1998). *The Magnetic Field of the Earth*. International Geophysical Series, v.63. Academic Press. 533 pp.
- Minguez, D., & Kodama, K. P. (2017). Rock magnetic chronostratigraphy of the Shuram carbon isotope excursion: Wonoka Formation, Australia. *Geology*, 45(6), 567-570.
- Moloto-A-Kenguemba, G. R., Trindade, R. I., Monié, P., Nédélec, A., & Siqueira, R. (2008). A late Neoproterozoic paleomagnetic pole for the Congo craton: Tectonic setting, paleomagnetism and geochronology of the Nola dike swarm (Central African Republic). *Precambrian Research*, 164(3-4), 214-226.
- Murphy, J. B., Nance, R. D., Cawood, P. A., Collins, W. J., Dan, W., Doucet, L. S., Heron, P.J., Li, Z.X., Mitchell, R.N, Pisarevsky, S., Pufahl, P.K., Quesada, C., Spencer, C.J, Strachan, R.A. & Wu, L. (2021). Pannotia: in defence of its existence and geodynamic significance. *Geological Society, London, Special Publications*, 503(1), 13-39.
- Pesonen, L.J., Salminen, J., Elming, S., Evans, D.A.T., Veikkolainen, T. (Eds.) (2021). *Ancient Supercontinents and the Paleogeography of Earth*. Elsevier, 646p.
- Poiré, D. G., Peral, L. E. G., & Arrouy, M. J. (2018). The Glaciations in South America. In *Geology of Southwest Gondwana* (pp. 527-541). Springer, Cham.
- Powell, C.M., 1995. Are Neoproterozoic glacial deposits preserved on the margins of Laurentia related to the fragmentation of two supercontinents? *Comment. Geology* 23, 1053–1054
- Prave, A. R., Condon, D. J., Hoffmann, K. H., Tapster, S., & Fallick, A. E. (2016). Duration and nature of the end-Cryogenian (Marinoan) glaciation. *Geology*, 44(8), 631-634.
- Pu, J. P., Bowring, S. A., Ramezani, J., Myrow, P., Raub, T. D., Landing, E., Mills, A, Hodkins, E. & Macdonald, F. A. (2016). Dodging snowballs: Geochronology of the Gaskiers glaciation and the first appearance of the Ediacaran biota. *Geology*, 44(11), 955-958.
- Rapalini, A. E. (2018). The assembly of western Gondwana: Reconstruction based on paleomagnetic data. In *Geology of Southwest Gondwana* (pp. 3-18). Springer, Cham.
- Rapalini, A. E., Tohver, E., Bettucci, L. S., Lossada, A. C., Barcelona, H., & Pérez, C. (2015). The late Neoproterozoic Sierra de las Ánimas Magmatic Complex and Playa Hermosa Formation,

- southern Uruguay, revisited: Paleogeographic implications of new paleomagnetic and precise geochronologic data. *Precambrian Research*, 259, 143-155.
- Rapalini, A.E., Franceschinis, P.R., Sanchez Bettucci, L., Arrouy, M.J. & Poiré, D.G., 2021. The Precambrian drift history and paleogeography of Rio de la Plata craton. En L. Pesonen et al. (Eds.), *Ancient Supercontinents and the Paleogeography of Earth*. Chapter 7. Elsevier. 243-262. ISBN 9780128185339
- Retallack, G. J. (2013). Ediacaran Gaskiers glaciation of Newfoundland reconsidered. *Journal of the Geological Society*, 170(1), 19-36.
- Robert, B., Besse, J., Blein, O., Greff-Lefftz, M., Baudin, T., Lopes, F., ... & Belbadaoui, M. (2017). Constraints on the Ediacaran inertial interchange true polar wander hypothesis: A new paleomagnetic study in Morocco (West African Craton). *Precambrian Research*, 295, 90-116.
- Robert, B., Greff-Lefftz, M., & Besse, J. (2018). True polar wander: A key indicator for plate configuration and mantle convection during the late Neoproterozoic. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(9), 3478-3495.
- Symons, D. T. A., & Chiasson, A. D. (1991). Paleomagnetism of the Callander Complex and the Cambrian apparent polar wander path for North America. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 28(3), 355-363.
- Thallner, D., Biggin, A. J., & Halls, H. C. (2021). An extended period of extremely weak geomagnetic field suggested by palaeointensities from the Ediacaran Grenville dykes (SE Canada). *Earth and Planetary Science Letters*, 568, 117025.
- Tohver, E., Trindade, R. I. F., Solum, J. G., Hall, C. M., Riccomini, C., & Nogueira, A. C. (2010). Closing the Clymene ocean and bending a Brasiliano belt: Evidence for the Cambrian formation of Gondwana, southeast Amazon craton. *Geology*, 38(3), 267-270.
- Trindade, R. I., D'Agrella-Filho, M. S., Epof, I., & Neves, B. B. B. (2006). Paleomagnetism of Early Cambrian Itabaiana mafic dikes (NE Brazil) and the final assembly of Gondwana. *Earth and Planetary Science Letters*, 244(1-2), 361-377.
- Xiao, S. H., & Narbonne, G. M. (2020). The Ediacaran Period. In *Geologic Time Scale 2020* (pp. 521-561). Elsevier.
- Zhao, G., Wang, Y., Huang, B., Dong, Y., Li, S., Zhang, G., & Yu, S. (2018). Geological reconstructions of the East Asian blocks: From the breakup of Rodinia to the assembly of Pangea. *Earth-Science Reviews*, 186, 262-286.