

25 AÑOS DE ESTUDIOS EN LA ZONA NO SATURADA DEL SUELO

D. Martín-Lammerding^{1*}, J.L. Gabriel^{1,2*}, M. Quemada², M.A. Campo-Bescós³, R. Muñoz-Carpena⁴, J. Carrera⁵
y J.V. Giráldez^{6,7}

¹Departamento de Medio Ambiente y Agronomía, INIA, Ctra. de La Coruña km 7,5, 28040 Madrid. lammerding@inia.es, gabriel.jose@inia.es

²CEIGRAM, Universidad Politécnica de Madrid, c/ Senda del Rey 13, 28040 Madrid. miguel.quemada@upm.es

³Dpto. de Proyectos e Ingeniería Rural, Universidad Pública de Navarra, Campus de Arrosadía, 31006 Pamplona. miguel.campo@unavarra.es

⁴Dpt. Agricultural and Biological Engineering, University of Florida, 287 Frazier Rogers Hall P.O. Box 110570, Gainesville, FL 32611-0570. carpena@ufl.edu

⁵IDAEA, CSIC, c/ Jordi Girona 18-26, 08034 Barcelona. jcrgeo@idaea.csic.es

⁶Dpto. Agronomía, Universidad de Córdoba, Edif. Da Vinci, Ctra. de Madrid km 396, 14071. aglgicej@uco.es

⁷Dpto. de Agronomía, IAS, CSIC, Avda. Menéndez Pidal s/n, Córdoba.

RESUMEN. La primera reunión sobre estudios en la Zona No Saturada en el Suelo (Castellón 1994) dio lugar a una serie de reuniones bienales que ha atraído a investigadores de diversos lugares y áreas de estudio. Durante estos años, las inquietudes tratadas han sido reflejo de nuestra sociedad y de las problemáticas que han necesitado ser abordadas en cada momento. Tras la celebración de las XIV Jornadas (Madrid 2019), nos planteamos evaluar los trabajos presentados durante estos 25 años. Hemos estudiado la evolución de la participación de los distintos grupos de investigación, la evolución de los problemas tratados, así como las diversas metodologías que han aparecido y se han ido desarrollando. Este análisis pretende servir de reflexión, para identificar las debilidades y fortalezas de esta red investigadora asociada a las Jornadas, para reforzarla y así continuar abordando los aspectos singulares y la problemática de esta zona "crítica" del suelo.

ABSTRACT. The first meeting about studies in the soil vadose zone (Castellon 1994) led to a series of biennial meeting that has attracted researchers from different world regions and topics. Along these years, the discussions reflect our society concerns and deal with scientific issues that need to be revisited at all times. After the celebration of the XIV Conference (Madrid 2019), we consider evaluating the works presented during these 25 years. We have studied the evolution of the participation of the different research groups, the evolution of the problems dealt with, as well as the various methodologies that have appeared and have been developed. This analysis aims to serve as a reflection, to identify the weaknesses and strengths of this research network associated with the Conference. As a result, we hope to strengthen the network and continue to address the unique aspects and problems of this "critical" region of the soil.

1.- Introducción

La Zona No Saturada (ZNS), que comprende el volumen de suelo que se encuentra entre la superficie topográfica y

la capa freática, o el borde superior de la franja capilar, es el escenario de la vida sobre el planeta. Es el espacio de intercambio de masa y energía del agua y las sustancias que ésta acarrea, sea en forma disuelta o suspendida, así como el filtro y almacén de residuos que pueden degradar las condiciones naturales. La ZNS alberga una población microbiana que induce o cataliza muchos procesos ecológicos esenciales. Por esta razón, a medida que los recursos agrarios e hídricos se van haciendo más escasos o perdiendo calidad, la investigación este dominio adquiere una mayor importancia, pudiendo considerarse la ZNS un recurso natural esencial para nuestra sociedad.

En 1994, en Castellón, se celebró una reunión sobre la investigación en la Zona No Saturada en el Suelo, que dio lugar a una serie de reuniones bienales, 14 hasta ahora. Estas reuniones se han convertido en un foro de intercambio de conocimiento y nuevas ideas, así como de debate sobre métodos de caracterización de este medio, nuevos modelos para describir los procesos y estímulo para colaboraciones entre los distintos grupos que en ella participan.

Por ello, el objetivo de este informe es hacer un análisis retrospectivo de la evolución de los temas abordados y la representación de los grupos participantes, para identificar las fortalezas y las debilidades de la Red, así como para corregir en el futuro estas carencias sin dejar de potenciar los puntos fuertes.

2.- Materiales y métodos

Se han evaluado todas las comunicaciones y ponencias presentadas entre las 14 Jornadas realizadas entre los años 1994 y 2019. Cada una de estas publicaciones se presentaron en formato de trabajo científico y fueron previamente revisadas por dos evaluadores externos. A lo largo de los años se han aceptado presentaciones en castellano, inglés y portugués. Cada una de las presentaciones se debía incluir en una de las 6 áreas en las que tradicionalmente se han clasificado los trabajos presentados, aunque esta clasificación también ha sufrido ligeras modificaciones con el tiempo. Estas áreas temáticas son:

- 1- Caracterización y análisis de la zona no saturada del suelo,
- 2- Infiltración/retención hídrica en el suelo y/o adsorción de sustancias en el sistema suelo-planta,
- 3- Recarga e interacción entre atmósfera, suelo y acuífero,
- 4- Contaminación y métodos de remediación,
- 5- Investigaciones sobre procesos de transferencia de masa y energía en la zona no saturada del suelo, a escala tanto de laboratorio como de campo y/o de invernadero,
- 6- Modelos descriptivos y predictivos de los procesos que acontecen en la zona no saturada del suelo.

Como en muchas ocasiones un mismo trabajo podría estar incluido en varios de los temas tratados, se ha mantenido el criterio que inicial adoptado por autores y revisores para encuadrarlo en una área.

3.- Resultados

3.1. Análisis cuantitativo de las Jornadas

En estos 25 años de Jornadas de la ZNS se han realizado un total 14 Jornadas (1994 en Castellón, 1995 en Vitoria, 1997 en Huelva, 1999 en Tenerife, 2001 en Pamplona, 2003 en Valladolid, 2005 en A Coruña, 2007 en Córdoba, 2009 en Barcelona, 2011 en Salamanca, 2013 en Lugo, 2015 en Alcalá de Henares, 2017 en Zaragoza y 2019 en Madrid). Entre todas ellas se han publicado un total de 578 trabajos firmados por un total de 1129 coautores diferentes, con una media de 2.10 trabajos presentados por cada

coautor y una media de 4.10 coautores por cada trabajo. Desglosando estos datos podemos observar, que la mayor parte de los autores sólo han firmado uno (770 autores, 68.2% del total), dos (174 autores, 15.4% del total) o tres trabajos (66 autores, 5.8% del total), representando al casi 90% del total de autores que han publicado al menos un trabajo en las Jornadas de la ZNS, pero sólo un 56% de las 2367 firmas totales presentadas. En el otro extremo encontramos a los 10 autores con más trabajos firmados (29.4 trabajos por autor de media), que representan sólo un 0.9% de los autores, pero un 12.4% de las firmas totales. De hecho, el autor con más trabajos (61), ha firmado el 10.6% de las 578 publicaciones. Y, evitando las duplicidades de dos o más coautores firmando el mismo trabajo), entre los 5 autores con más trabajos aportados suman 138 (el 23.9% de los mismos y entre los 10 con más comunicaciones suman 191, una tercera parte del total.

En cuanto al número de coautores por trabajo, aunque la media a lo largo de los 25 años es de 4.10, el 42% de los trabajos tienen 3 o menos, casi el 50% tienen 3 o 4 coautores y, sólo el 10% los firman 7 o más coautores. Esta media de coautores también ha evolucionado claramente con los años. En las dos primeras ediciones de las Jornadas de la ZNS, el número de coautores por trabajo rondaba los 2.8 coautores por trabajo, pero esa media se ha ido incrementando progresivamente hasta duplicarse en 2019, con 5.8 coautores por trabajo de media. De hecho, no sólo la media se ha incrementado, sino también su desviación típica, que ha pasado de 1.2 en las primeras jornadas a 2.9 en 2019. De hecho, en 2019 se han encontrado 2 de los 3 trabajos con más coautores registrados a lo largo de los 25 años (con 16 y 12 coautores respectivamente).

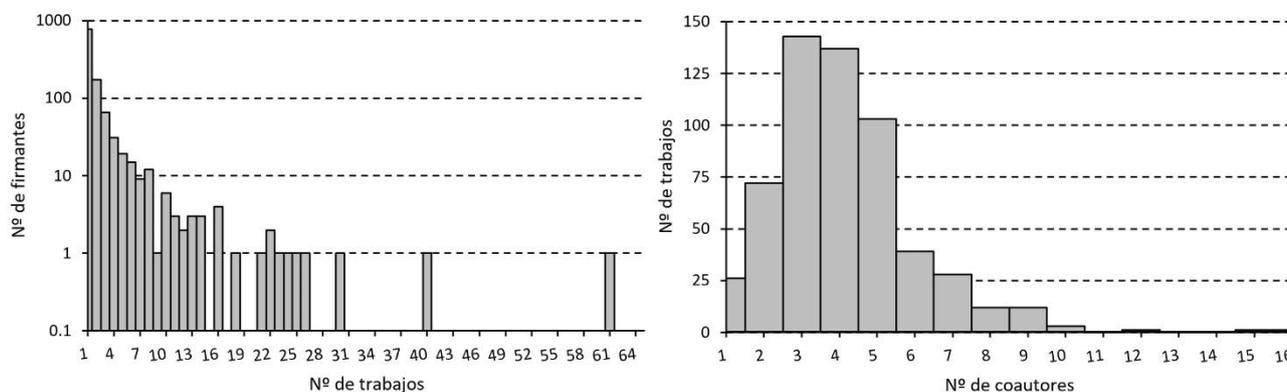


Fig. 1. Distribución del número de trabajos presentados por uno de los 1129 coautores que han firmado al menos un trabajo a lo largo de los 25 años de las Jornadas de la ZNS, así como la distribución del número de trabajos con varios coautores.

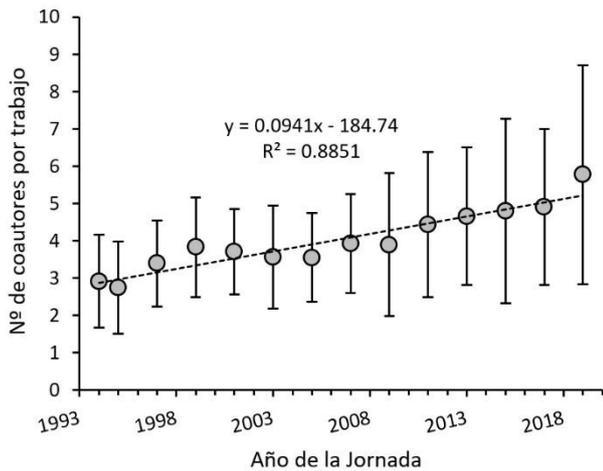


Fig. 2. Evolución a lo largo de los 25 años de las Jornadas de la ZNS de la media de coautores por cada trabajo presentado. Las barras representan la desviación típica observada.

En cuanto al idioma de los trabajos presentados, a lo largo de los 25 años, el castellano ha sido la lengua principal con un 86% de los trabajos. Le han seguido el inglés con 13% y el portugués con un 2%. El primer trabajo en inglés se publicó en 2003 y fue creciendo su proporción hasta superar el 25% del total de los trabajos presentados en los años 2009 (con el máximo absoluto de trabajos en inglés en un año, 18), 2013 y 2015 (con el máximo absoluto en proporción a los trabajos presentados, 29%). Tras estos máximos, la proporción de trabajos en inglés ha descendido en las dos últimas Jornadas, llegando a representar sólo el 11% en 2019, coincidiendo con las secuelas de la crisis económica mundial. Por otro lado, los dos primeros trabajos en portugués se recibieron en 2013, lo que representó el 6% de los trabajos totales. Y, aunque no hubo ninguno en 2015, en 2017 y 2019 se publicaron 4 trabajos cada año, alcanzando el 8 y 11% del total de los trabajos publicados.

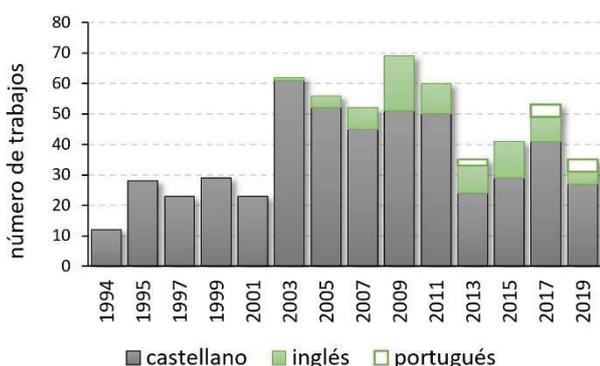


Fig. 3. Evolución a lo largo de los 25 años de las Jornadas de la ZNS del idioma de los trabajos presentados.

Por último, a lo largo de los 25 años hay muchos autores que han mostrado una gran fidelidad a estas Jornadas. De hecho, hay 9 autores que han presentado trabajos en al menos 10 de las 14 jornadas, coincidiendo 8 de ellos en no haber participado en la primera Jornada de 1994. En cuanto

a los 2 más fieles, han llegado a participar ininterrumpidamente desde la Jornada de 1995 (para un total de 13 Jornadas cada uno) y otros 3 autores que han participado en 12 de las 14 Jornadas. Analizando las participaciones de los autores que han publicado al menos 7 trabajos, observamos que todos han participado en un mínimo de 4 Jornadas, con una media de asistencia a 7 Jornadas y una publicación media de 2 trabajos por Jornada (con un máximo de 4.5 publicaciones por Jornada).

3.2. Análisis temático de las Jornadas

En estos 25 años de Jornadas de la ZNS los temas abordados y su importancia relativa dentro de cada Jornada ha variado mucho. Empezando por las 6 áreas temáticas que generalmente se han definido, vemos que hay áreas mucho más constantes que otras. Por un lado, está el área 1, *Caracterización y análisis de la ZNS del suelo*, que desde el inicio se ha movido en un peso medio del 26% de los trabajos publicados, oscilando entre 17 y el 35%. Sólo alcanzó el 42% el primer año, cuando sólo 4 temáticas tuvieron representación. Una situación similar se observa con el área temática 6, *Modelos descriptivos y predictivos de los procesos que acontecen en la ZNS*, con un peso medio del 19% y siempre oscilando entre el 7 y el 30%. En el otro extremo, están las áreas temáticas cuya importancia ha variado mucho a lo largo de los años. En este caso hay dos tipos de áreas, las que durante los primeros años no tuvieron un peso relativo importante en las Jornadas pero que lo han ido adquiriendo con el tiempo y las que han pasado por ciclos de mayor o menor peso. Dentro del primer tipo están las áreas 3, *Recarga e interacción entre atmósfera, suelo y acuífero*, y 5, *Investigaciones sobre procesos de transferencia de masa y energía en la zona no saturada del suelo, a escala tanto de laboratorio como de campo y/o de invernadero*. Ambas áreas tienen un peso relativo medio del 10 y el 13% respectivamente, con escasa representación (o incluso sin representación) a lo largo de los 10 primeros años, pero han alcanzado pesos relativos del 26 y el 37% respectivamente en los últimos 6 años. Dentro del segundo tipo se encuentra el área temática 4, *Contaminación y métodos de remediación*, que con un peso relativo medio del 14%, alcanzó más del 42% en las primeras dos jornadas, cayó a menos del 3% entre los años 2007 y 2011, se ha estabilizado en torno al 15% en las últimas 3 Jornadas. Finalmente se encuentra el área temática 2, *Infiltración/retención hídrica en el suelo y/o adsorción de sustancias en el sistema suelo-planta*, con una situación intermedia entre las áreas temáticas estables (1 y 6) y la cíclica (4), ya que presenta un relativo medio del 17%, bastante estable en general, pero con un máximo del 41% y un valle del 0% en los años 2005 y 2013, respectivamente.

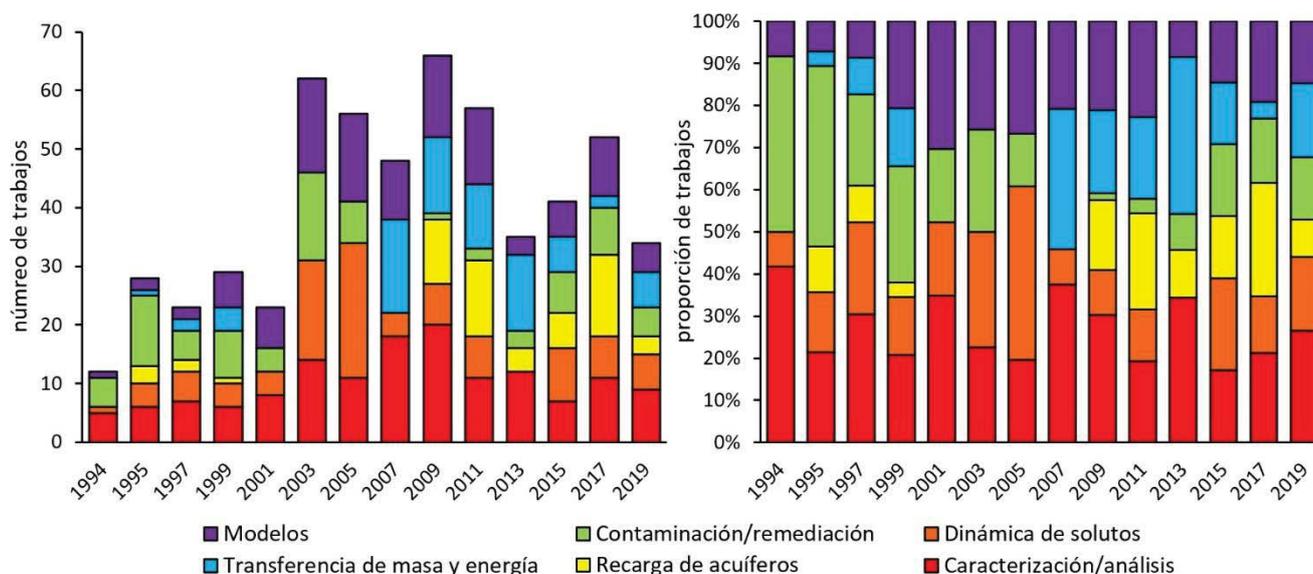


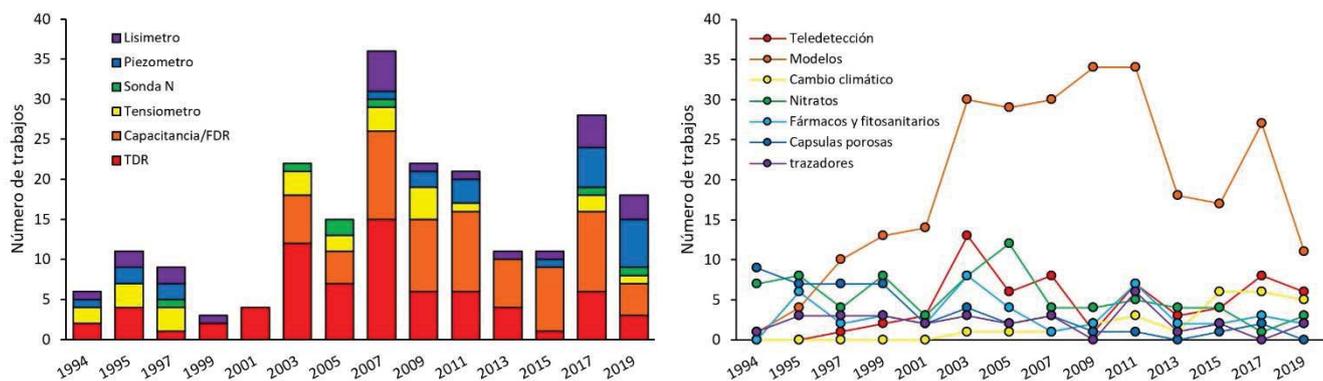
Fig. 4. Resumen del número de trabajos presentados en cada uno de los años a cada una de las 6 áreas temáticas en las que se dividen las Jornadas de la ZNS. Datos presentados en valor absoluto y en proporción al total e trabajos presentados en cada una de las Jornadas.

Descendiendo a temas más concretos se observan tendencias similares. Por ejemplo, el lixiviado de nitratos ha acaparado el 13% de los trabajos durante estos 25 años, pero su interés fue mucho más elevado durante los primeros años (estando presente en el 58% de los trabajos en 1994, y en torno al 33% de media entre las 4 primeras jornadas) que durante los últimos (con valores por debajo del 10% desde 2007). De forma inversa, han ido apareciendo temas como el cambio climático, que no tuvieron presencia hasta el año 2003, pero que durante las últimas 3 jornadas ha sido incluido en el 15% de los trabajos. Otro tema recurrente es el del lixiviado y adsorción de sustancias químicas como fármacos y fitosanitarios (en torno al 8% de media de presencia en el total de los trabajos publicados). Sin embargo, estos temas han sido más populares en todas las jornadas, oscilando entre el 2 y el 21%.

En cuanto a los métodos empleadas, destaca el uso de modelos de distinta índole y escala, que si bien en 1994 y 1995 no pasaban del 14% de presencia en los trabajos publicados, desde 1997 no han bajado del 31% en ningún año y presentan un 47% de presencia en el total de las publicaciones de los 25 años. También es interesante el uso de cápsulas porosas, que se han usado en un 8% de los trabajos presentados, aunque su mayor interés estuvo durante las primeras 4 Jornadas, donde su presencia nunca bajó del 24% de los trabajos presentados, alcanzando un 75% en 1994, y oscilando alrededor del 5% desde 2003. El uso de trazadores es otra técnica que fue más importante durante los primeros años cayendo en desuso después, que rondaba el 10% de presencia entre 1994 hasta 2001 pero que desde 2003 rara vez pasa del 5% incluyendo varios

años donde no han aparecido. Un caso opuesto es el empleo de la teledetección, donde el primer trabajo se presentó en 1997 (con un 4% de representación) y desde entonces ha aparecido en numerosos trabajos, llegando a un 21% de los trabajos publicados en 2003, y manteniéndose por encima del 15% desde 2017 (para una media total del 11% de presencia en todos los trabajos publicados en las jornadas).

En cuanto a otras técnicas de medida la humedad del suelo en la ZNS hemos recogido el uso de sondas TDR (en el 12% de los trabajos publicados), sondas de capacitancia/FDR (en el 11%), tensiómetros (en el 4%), sondas de neutrones (en el 1%), piezómetros (en el 3%) y el empleo de lisímetros (en el 3%). Cabe destacar, que hubo un aumento importante en el número de trabajos presentando estos sensores (si bien no en porcentaje de pero sí en el número total de comunicaciones) a partir de 2003. Pero de nuevo, el uso de unos u otros ha variado mucho a lo largo de los años. Durante los primeros años el uso de sondas TDR y de tensiómetros fue muy frecuente. Sin embargo, a partir de 2003 se incorporó el uso de sensores de tipo capacitivo y FDR, que en poco tiempo consiguieron ser los favoritos en los diferentes ensayos expuestos. El uso de las sondas de neutrones ha sido siempre marginal en estas Jornadas. Finalmente, el uso de otros equipos como los piezómetros y los lisímetros, han mostrado ciertos cambios a lo largo del tiempo, pero sin tendencias claras al no haberse usado masivamente en ningún momento.



3.3. Análisis regional de las Jornadas

Haciendo un análisis de las instituciones que han firmado los trabajos, en total han sido coautoras de 1105 trabajos. De estas coautorías, el 76% han sido firmadas por instituciones españolas (846) y el 24% restante por instituciones extranjeras (259), mostrando una gran internacionalización. Ya en 1994, el porcentaje de instituciones extranjeras significó el 30% de las coautorías, sin embargo, entre 1995 y 2003 esta internacionalización se redujo (manteniéndose siempre por debajo del 15%). Pero desde 2005 no ha bajado nunca del 20%, llegando incluso a representar el 33% en 2011 y 2015. En total se ha contado con representación 138 instituciones distintas procedentes de 27 países extranjeros en al menos una ocasión. Los países con mayor presencia han sido Estados Unidos (56 coautorías), Argentina (47), Brasil (33), Francia (30), Portugal (14), Holanda (11) y Bélgica, México y Alemania (8 cada uno). Cabe destacar también que a lo largo de los 25 años ha habido representación del resto de continentes habitados: África (Marruecos, 5 coautorías), Asia (Israel, 2,

Japón, 1, y Mongolia, 1) y Oceanía (Australia, 2). De los países con mayor número de coautorías, Argentina, Brasil y Portugal presentan la mayor parte de ellas (más del 66%) en las últimas 5 jornadas, mientras que Estados Unidos ha tenido una colaboración más constante desde 1999 (aunque con un pico de coautorías en torno al 2009) y Francia, que ha sido el más regular, firmando entre 1 y 4 trabajos en todas y cada una de las 14 Jornadas.

Dentro de las instituciones extranjeras, destacan los 21 trabajos firmados por la University of Florida (EE.UU.), los 13 del CNRS (Francia), los 11 del USDA (EE.UU.), los 9 del INTA (Argentina) y de la Universidade Federal do Maranhão (Brasil), los 8 del Instituto de Hidrología de Llanhau (Argentina) y los 6 de la Université Catholique de Louvain (Bélgica), De la Universidad Nacional de Entre Ríos (Argentina) y de Wageningen University (Holanda). Y muchos de ellos han presentado colaboraciones muy constantes a lo largo de los 25 años de Jornadas.

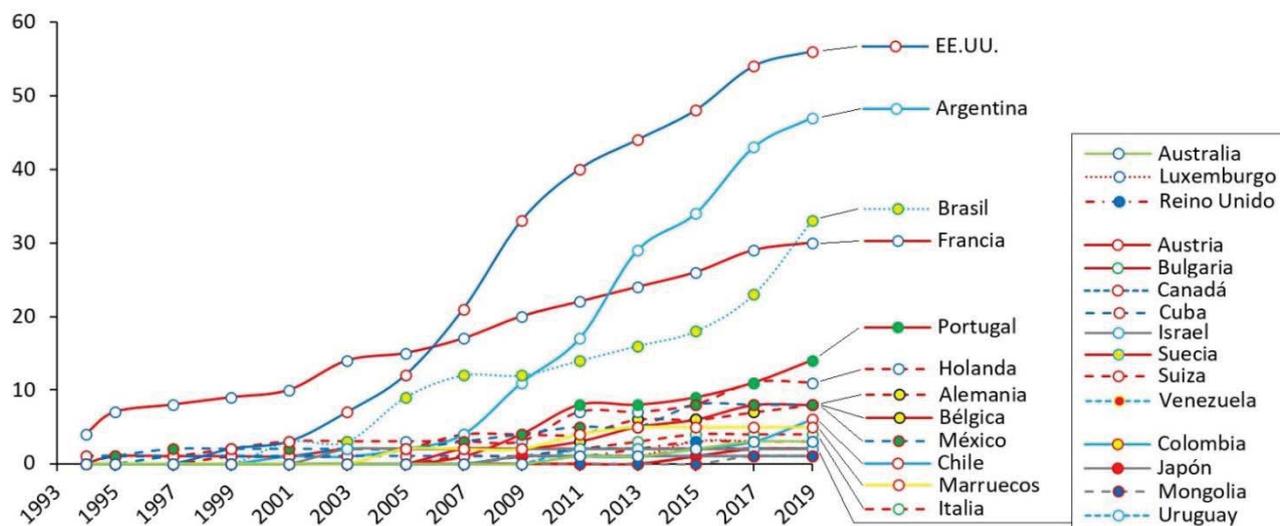


Fig. 6. Número de coautorías de trabajos de las instituciones extranjeras (en base al país de procedencia) en el total de los 25 años.

