Aida Fernández Ríos

Da produtividade das rías á acidificación oceánica

Edición a cargo de Fiz Fernández Pérez e Gabriel Rosón Porto

Editan: © Real Academia Galega de Ciencias, 2026
© Consello da Cultura Galega, 2026
Produce: GCiencia
Deseño: Araceli Jáuregui. A Estudio Gráfico
Imaxe da cuberta: Antón Pulido
Depósito legal: C 1589-2026
DOI: 10.17075/afrprao.2026

Aida Fernández Ríos:

da produtividade das rías á acidificación oceánica

Índice

O rigor da ciencia, a alegría de vivir
Juan Manuel Lema Rodicio 7

Cun pé na terra e outro no mar
Dolores Vilavedra 13

Limiar
Fiz Fernández Pérez e Gabriel Rosón Porto 17

Aida Fernández Ríos: a ciencia como vocación, a vida como legado
Miguel Ángel Fernández Fernández 31

Ciencia e compromiso: Galega Destacada (2002)
María Concepción Villanueva Ruiz e Rosa Fontaíña Pazos 45

Aida Fernández Ríos: aprender a ciencia desde o banco de laboratorio (1972-1987)
Antonio Figueras 51

Hidrografía e bioxeoquímica das rías galegas
Enrique Nogueira García 61

Máis alá dos legados de A. C. Redfield e W. S. Broecker:
revisando a estequiometría dos océanos
Xosé Antón Álvarez Salgado 77

A linguaxe das masas de auga
Carmen González Castro e Alicia Lavín 93

De GASPAR á rede global de observacións superficiais de CO_2 nos océanos
Xosé Antonio Padín Álvarez 111

Aida e o periplo oceánico do CO_2
Gabriel Rosón Porto 149

A acidificación do océano: observar e comprender o cambio
Maribel I. García-Ibáñez 173

Aida Fernández Ríos: unha ciencia de excelencia e de colaboración
Herlé Mercier 193

Aida Fernández Ríos: compañeira e amiga
Carmen González Sotelo e José Luis Garrido 199

O rigor da ciencia, a alegría de vivir

Hai persoas cuxa pegada non pode explicarse unicamente a través dos seus logros profesionais. A súa verdadeira dimensión aparece cando contemplamos, ao mesmo tempo, a obra que realizaron, o camiño que percorreron e a influencia que exerceron sobre cantos as rodearon. Aida Fernández Ríos pertence, sen dúbida, a ese grupo excepcional.

Cando unha institución como a Real Academia Galega de Ciencias (RAGC) decide render homenaxe a unha das súas académicas, faino convencida de que a memoria individual é tamén patrimonio colectivo. Aida merecía esta obra, e esta obra merecía saír á luz. Non só pola relevancia da súa traxectoria científica, senón porque a súa vida encerra valores e ensinanzas que deben ser coñecidos e transmitidos ás novas xeracións.

A Academia escolleuna como científica galega do ano 2026 para recoñecer unha das figuras máis destacadas da investigación mariña desenvolvida en Galicia e, ao mesmo tempo, para achegar á sociedade unha personalidade que transcende amplamente a relación dos seus méritos profesionais. Para a RAGC esta homenaxe posúe, ademais, un significado especialmente emotivo. Aida incorporouse en 2015 como académica numeraria. A súa presenza entre nós foi, por desgraza, demasiado breve, mais deixou unha pegada que a institución conserva con afecto, admiración e gratitude.

O libro que agora presentamos non pretende ser unha biografía exhaustiva nin un catálogo de publicacións, proxectos e recoñecementos. Pretende, sobre todo, ofrecer unha visión de 360 graos dunha persoa que soubo ser, ao mesmo tempo e coa mesma intensidade, científica e profundamente humana. Porque en Aida estas dúas dimensións nunca estiveron separadas: a súa maneira de facer ciencia era inseparable da súa maneira de relacionarse co mundo, e a súa proximidade e calidez persoais non restaban unha soa liña de rigor ao seu labor investigador.

Esta presentación tampouco quere anticipar o contido dos capítulos que seguen. Son as voces aquí reunidas —familiares, amizades, compañeiros e compañeiras, discípulos, persoal técnico e colaboradores/as— as que deben conducir o lector pola súa vida e pola súa obra. Cada unha ilumina un ángulo diferente; cada lembranza engade un matiz; cada contribución permite descubrir unha Aida máis completa. Xuntas configuran un retrato que dificilmente podería construír unha única persoa: non unha simple suma de feitos, senón a comprensión dunha personalidade capaz de transformar os espazos, os proxectos e as persoas cos que entrou en contacto.

Aida foi unha muller que soubo construír desde abaixo. Chegou á investigación por un itinerario académico pouco convencional. Comezou como auxiliar de investigación e aprendeu a ciencia desde a proximidade aos instrumentos, ás mostras e aos datos. Aprendeu a medir con precisión, a desconfiar dun resultado dubidoso, a repetir unha análise e a aceptar con humildade que o erro forma parte do camiño cara ao coñecemento. Esa cultura do dato ben

obtido, da observación paciente e da esixencia metodolóxica acompañouna ao longo de toda a súa carreira. Nunca perdeu a capacidade de sorprenderse ante un resultado revelador nin a disciplina de quen sabe que a ciencia, antes de formular grandes conclusións, debe aprender a observar e medir ben.

A súa traxectoria constitúe tamén unha lección de perseveranza. Compaxinou o traballo coa formación, avanzou paso a paso e chegou a ocupar as máis altas responsabilidades científicas e institucionais sen esquecer nunca o seu punto de partida. Esa experiencia explica, probablemente, o respecto que mostrou sempre polo persoal técnico e por todas as persoas que sosteñen a investigación desde funcións ás veces pouco visibles. Aida sabía que a excelencia non é o resultado dunha individualidade illada, senón dunha estrutura humana na que cada contribución importa.

Soubo igualmente ampliar o horizonte sen perder a raíz. A súa investigación avanzou desde as rías galegas ata o océano global mediante unha evolución coherente, sen rupturas artificiais nin abandono do aprendido. Cada nova pregunta nacía da anterior; cada cambio de escala conservaba a curiosidade inicial. Esa capacidade para relacionar o próximo co universal, para comprender que os procesos observados nas nosas costas forman parte dos grandes equilibrios do planeta, constitúe unha das marcas máis singulares da súa obra e unha das leccións máis valiosas que nos deixa.

Pero Aida non só produciu coñecemento; soubo crear comunidade. Non concibía a ciencia como unha actividade solitaria nin como un exercicio de competencia permanente. Estableceu alianzas, formou equipos e contribuíu a

construír redes de colaboración que continúan activas máis alá da súa ausencia. A súa maneira de liderar pasaba pola capacidade de escoitar, integrar perspectivas e facer que cada persoa sentise que o seu traballo era necesario. Quen compartiu con ela un laboratorio, unha campaña oceanográfica, unha reunión ou unha responsabilidade de xestión sabe que tiña o don de converter o traballo colectivo nunha experiencia estimulante e, con frecuencia, gozosa.

A alegría foi, precisamente, outro dos seus trazos máis recordados. Unha alegría vital, espontánea e contaxiosa, compatible coa maior seriedade científica. Sabía relativizar as dificultades, celebrar os logros alleos e introducir humanidade nas xornadas máis esixentes. A súa vitalidade non era un simple aderezo da súa personalidade, senón unha forma de estar no mundo e de entender que o rigor non está rifado coa ilusión, nin a excelencia coa proximidade.

Aida asumiu tamén a responsabilidade social do coñecemento. Investigaba o océano movida por unha poderosa curiosidade intelectual, pero tamén pola convicción de que comprender o funcionamento do planeta constitúe unha obriga ante a sociedade e ante as xeracións futuras. Sabía que a ciencia non pode permanecer allea aos grandes desafíos do noso tempo e que o coñecemento alcanza a súa plenitude cando contribúe a interpretar os problemas, advertir dos riscos e construír respostas responsables.

A RAGC acolle con orgullo esta publicación. Ao facelo, non pretende pechar unha historia, senón mantela viva. Convido o lector ou lectora a achegarse a estas páxinas con curiosidade e sen présa; a coñecer a científica, mais

tamén a compañeira, a amiga, a xestora e a muller que soubo facer da súa vocación un exemplo duradeiro. Ao avanzar no libro, descubrirá certamente a importancia da súa contribución á oceanografía, pero comprenderá tamén por que tantas persoas a lembran cun sorriso.

Oxalá esta obra permita que a sociedade galega, e máis alá dela, descubra ou redescubra a Aida Fernández Ríos. Que axude a preservar o seu legado e a transmitir unha maneira de entender a ciencia baseada na precisión, na cooperación, na responsabilidade e na alegría de coñecer. Porque hai persoas que continúan presentes no que descubriron, nas institucións que fortaleceron e, sobre todo, na memoria agradecida de quen tivo a fortuna de compartir con elas unha parte do camiño.

Juan Manuel Lema Rodicio
Presidente da RAGC

Cun pé na terra e outro no mar

Como presidenta do Consello da Cultura Galega é para min non só una honra, senón tamén una fonda satisfacción, ter o privilexio de asinar estas palabras liminares que lle darán a benvida a quen se adentre na lectura desta obra, engaiolante e rigorosa como debeu ser a muller que a protagoniza, Aida Fernández Ríos, electa científica galega do ano 2026 pola Real Academia Galega de Ciencias. As páxinas deste volume constitúen, posiblemente sen querelo de xeito consciente os seus autores e autoras, un apaixonado testemuño a prol do coñecemento como eixe existencial e da vontade de saber como motor dunha vida tan intensa e gozada como a que semella foi a de Aida.

A biografía profesional e científica desta oceanógrafa insigne é exemplar por moitos motivos. Querería sinalar agora apenas dous, que me interpelan singularmente, pois quen lea as páxinas seguintes terá ocasión de sucumbir ao engado da súa figura, que por momentos podería ser case a protagonista dunha novela. En primeiro lugar, constato con fachenda o feito de que a galega Aida Fernández Ríos foi una pioneira en moitos ámbitos, pero especialmente en facer realidade algo ao que tardariamos en atoparlle un nome: o *glocal,* ese difícil equilibrio entre procesos globais e locais que, cada vez máis, se nos revela como unha síntese imprescindible para a supervivencia da nosa especie. Cun ollo posto nas rías galegas e outro nos océanos, cun

pé na terra e outro no mar, o labor científico de Aida foi capital para situar a investigación mariña galega no contexto internacional dos actuais estudos oceanográficos. Como de novo ficou de manifesto na recente pandemia da covid, e como nestes días tórridos de agosto de 2026 nos lembraba o oceanógrafo Carl Wunsch, o coñecemento científico non coñece fronteiras e, por iso mesmo, é imposible tamén poñerlle cancelas, como se cadra algúns quererían.

En segundo lugar, síntome tamén fondamente interpelada pola traxectoria profesional e vital de Aida, que considero un exemplo de como construír unha carreira científica dende a base e a constancia, algo especialmente valioso nuns tempos en que a hipercuantificación dos méritos chega a exercer tal presión na mocidade investigadora que a miúdo cancela o pracer inherente ao proceso investigador, a esa busca de respostas a unha pregunta da que parte todo e que nunca sabemos a onde nos vai levar. A vontade de saber que alicerza a evolución profesional de Aida Fernández Ríos debe ser valorada, nunha sociedade cada vez máis pragmática e consumista, como unha inspiración: hai outras formas de exercer como seres humanos e, do que podemos deducir do que contan amizades e colegas da investigadora, tamén de ser feliz. Se cadra, mudar a perspectiva xerárquica pola transversal axudaranos a ampliar o campo de visión e a cambiar o paradigma: xustamente unha mudanza desa natureza foi o motor da «transformación completa» experimentada pola oceanografía nos últimos trinta anos, unha transformación que fixeron posible centos, quizais miles (de novo, remítome ás afirmacións de Carl Wunsch),

de investigadores e investigadoras anónimas como a nosa Aida, quen agora, grazas á Real Academia Galega de Ciencias, nos é un pouquiño máis coñecida.

E permítanme aínda un excurso biográfico: como viguesa, recoñezo con emoción, na miña biografía familiar, moitas coincidencias coa de Aida e son consciente de que transitei por moitos dos camiños (vitais pero tamén urbanos) que foron os seus. Os círculos péchanse, os ciclos continúan, todo muda mais sempre hai pegadas que permanecen, indelebles, para guiarnos. Así avanzamos.

Dolores Vilavedra
Presidenta do Consello da Cultura Galega

Limiar

A traxectoria científica de Aida Fernández Ríos constitúe unha das contribucións máis destacadas da oceanografía galega ao coñecemento do océano e do seu papel no sistema climático terrestre. Ao longo de máis de catro décadas de actividade investigadora, participou na transformación dunha disciplina que pasou de describir procesos locais en ecosistemas costeiros a abordar cuestións de alcance planetario relacionadas co ciclo do carbono, o cambio climático e a acidificación oceánica. Desde os seus primeiros traballos nas rías galegas ata as investigacións máis recentes sobre o dióxido de carbono antropoxénico almacenado no océano, a súa carreira caracterízase pola continuidade temática, o rigor metodolóxico e unha permanente capacidade para integrar observacións, técnicas e escalas de estudo moi diversas. As súas investigacións contribuíron tamén a comprender mellor un dos grandes servizos ecosistémicos que presta o océano ao planeta: a absorción dunha parte substancial do dióxido de carbono emitido polas actividades humanas. Grazas a esta función reguladora, o océano actúa como un importante amortecedor do cambio climático, aínda que ao prezo de modificacións progresivas da súa química interna que hoxe coñecemos como acidificación oceánica.

Mais a singularidade da súa traxectoria non reside unicamente na relevancia dos seus resultados científicos. Aida non accedeu á investigación seguindo o itinerario académico tradicional. Iniciou a súa actividade profesional en 1972 como auxiliar de investigación no Instituto de Investigaciones Pesqueras de Vigo, antecedente do actual Instituto de Investigacións Mariñas. Só anos máis tarde retomaría os estudos universitarios, obtería a licenciatura e completaría o doutoramento. Esta evolución converte a súa carreira nun exemplo pouco frecuente de aprendizaxe continua, esforzo persoal e promoción baseada no mérito científico, desde o traballo técnico ata os máis altos niveis da investigación española.

Aquel período inicial resultou decisivo para a súa formación. O traballo diario en técnicas analíticas fundamentais da oceanografía química, como a determinación da salinidade, do osíxeno disolto ou da composición elemental da materia orgánica, permitiulle adquirir unha profunda cultura da medida e da calidade do dato. A observación rigorosa, a reproducibilidade das análises e o control

sistemático das fontes de erro converteríanse, desde entón, nunha constante do seu xeito de facer ciencia. A importancia atribuída á fiabilidade das observacións marcou toda a súa carreira e deixou unha fonda pegada nas xeracións de persoal investigador e técnico cos que compartiu laboratorio, campañas oceanográficas e proxectos científicos. Esta sólida formación experimental permitiulle construír interpretacións robustas e reutilizar datos obtidos décadas atrás para responder preguntas científicas que nin sequera existían cando aqueles rexistros foran recollidos.

O fío condutor desta obra colectiva, «Da produtividade das rías á acidificación oceánica», resume con precisión unha traxectoria científica articulada arredor dun mesmo fío condutor: a comprensión do océano como un sistema bioxeoquímico complexo, resultado da interacción continua entre procesos físicos, químicos e biolóxicos, e profundamente influído pola actividade humana. A evolución das súas investigacións non responde a unha sucesión de temas independentes, senón á ampliación progresiva da escala de observación, desde os ecosistemas costeiros galegos ata os grandes procesos que regulan o funcionamento do océano global.

Os primeiros traballos de Aida desenvolvéronse nas rías galegas, ecosistemas costeiros de elevada produtividade biolóxica estreitamente ligados á dinámica do afloramento costeiro. Durante as décadas de 1970 e 1980, estes sistemas constituíron un escenario privilexiado para investigar a relación entre a circulación oceánica, a dispoñibilidade de nutrientes e a produción biolóxica. Neste contexto, centrou os seus esforzos no estudo da bioxeoquímica do fitoplancto, da composición da materia orgánica mariña e dos mecanismos que controlan a produtividade destes ecosistemas.

As rías representaban auténticos laboratorios naturais onde podían analizarse, en escalas espaciais e temporais relativamente accesibles, procesos fundamentais do funcionamento do océano. O traballo desenvolvido por Aida contribuíu de maneira decisiva a establecer as bases do coñecemento moderno da hidrografía e da bioxeoquímica das rías galegas. A través da análise de balances de nutrientes, da circulación estuárica e da dinámica do plancto, foi posible comprender mellor os mecanismos que regulan os fluxos de materia e enerxía nestes sistemas costeiros.

Un dos aspectos máis relevantes desta etapa foi o estudo da composición elemental do plancto e das relacións estequiométricas entre carbono, nitróxeno, fósforo e osíxeno. Desenvolvidos en

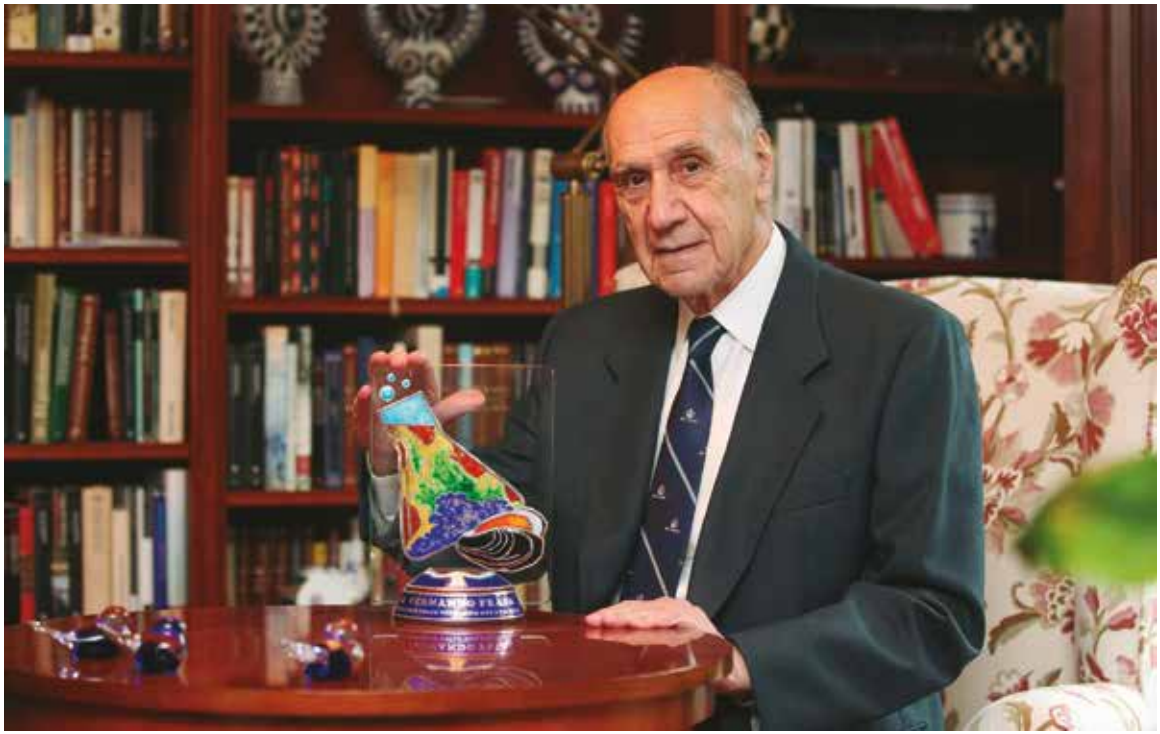
estreita colaboración con Fernando Fraga, estes traballos permitiron revisar e refinar as formulacións clásicas derivadas das relacións de Redfield e mellorar a interpretación dos procesos bioxeoquímicos que teñen lugar na columna de auga. Estas investigacións deron lugar a formulacións revisadas dos trazadores NO, PO e CO, que ampliaron a capacidade de discriminar entre os efectos da mestura de masas de auga e os procesos biolóxicos. Tamén permitiron desenvolver novos parámetros conservativos, entre eles o CAO, antecedente dos trazadores utilizados posteriormente para a cuantificación do CO_2 antropoxénico.

Ao mesmo tempo, a aplicación de modelos de caixas permitiu cuantificar os balances de nutrientes, os tempos de residencia da auga e a variabilidade estacional dos fluxos de materia nas rías. Estas aproximacións proporcionaron unha visión integrada do funcionamento dos ecosistemas costeiros e sentaron as bases metodolóxicas que posteriormente serían extrapoladas ao estudo do océano aberto.

A finais da década de 1980 e comezos dos anos noventa, a investigación de Aida ampliou a súa escala de observación cara ao Atlántico Norte. Esta transición non supuxo unha ruptura cos traballos anteriores, senón unha evolución natural. Comprender plenamente os procesos que teñen lugar nas rías galegas requiría coñecer tamén as masas de auga que condicionan a súa dinámica, a súa orixe, os seus percorridos e as transformacións físicas e químicas que experimentan durante a súa circulación polo océano.

Esta nova etapa desenvolveuse en estreita colaboración con Fernando Fraga, figura central da oceanografía química en Galicia e director da súa tese de doutoramento. A influencia de Fraga foi moito máis alá da supervisión académica. O seu enfoque integrador da física, a química e a bioloxía mariñas, a procura permanente da coherencia entre observacións e interpretacións e a esixencia na calidade dos datos deixaron unha pegada profunda na formación científica de Aida. Moitos dos avances desenvolvidos durante aqueles anos naceron precisamente desta colaboración continuada, que contribuíu de maneira decisiva á caracterización das masas de auga do Atlántico nororiental e ao estudo dos procesos responsables da súa formación, transformación e distribución.

A combinación de hidrografía, química mariña e bioxeoquímica permitiu abordar preguntas que transcendían xa o ámbito costeiro. As masas de auga deixaban de ser simples entidades físicas definidas



O profesor Fernando Fraga Rodríguez (1922-2020), pioneiro da oceanografía galega e membro numerario da RAGC (1981), director de tese e mentor de Aida Fernández Ríos, co agasallo conmemorativo da súa homenaxe no XV Seminario Ibérico de Química Mariña (Vigo, 2010)

pola temperatura e a salinidade para converterse en compoñentes activos dos ciclos bioxeoquímicos. A través delas transpórtanse nutrientes, osíxeno, carbono e calor, conectando rexións oceánicas afastadas e exercendo unha influencia decisiva sobre o clima e os ecosistemas mariños.

Durante estes anos, Aida participou en numerosas campañas oceanográficas internacionais que ampliaron significativamente a capacidade de observación do océano Atlántico. A acumulación de datos obtidos mediante seccións hidrográficas repetidas permitiu construír unha visión cada vez máis detallada da circulación oceánica e da distribución dos principais parámetros químicos no interior do océano.

De maneira paralela a estes estudos das masas de auga, Aida impulsou unha liña de investigación centrada nos intercambios de dióxido de carbono entre o océano e a atmosfera. Naquel momento comezaba a consolidarse a evidencia de que o océano desempeñaba un papel esencial na regulación do clima terrestre, mais seguían existindo grandes incertezas sobre a magnitude e variabilidade dos fluxos de CO_2 entre ambos os compartimentos.

Aida comprendía que o progreso científico non depende unicamente das ideas ou das publicacións, senón tamén da capacidade para obter observacións fiables, sostidas no tempo e comparables a escala internacional. Por iso impulsou o desenvolvemento de metodoloxías, instrumentación e procedementos de control de calidade que contribuíron a fortalecer as capacidades de observación do océano e a consolidar redes de colaboración científica que continúan activas na actualidade.

Neste contexto promoveu o desenvolvemento do sistema GASPAR (Gas Parity), unha plataforma pioneira de medida continua e automática da presión parcial de CO_2 na auga de mar. O sistema foi deseñado para funcionar de maneira autónoma a bordo de buques oceanográficos e permitiu obter rexistros continuos en condicións operativas moi diversas. Co paso dos anos incorporáronse outros parámetros de interese, como temperatura, posición xeográfica, presión, salinidade ou osíxeno disolto, e converteuse nunha ferramenta de observación particularmente versátil.

A importancia de GASPAR foi moito máis alá do desenvolvemento tecnolóxico. As extensas series de datos obtidas mediante este sistema permitiron analizar a variabilidade espacial e temporal do CO_2 superficial con resolucións impensables ata aquel momento. Os rexistros xerados polo grupo de Aida contribuíron de maneira decisiva á construción do atlas internacional SOCAT (Surface Ocean CO_2 Atlas), unha das infraestruturas científicas máis importantes para o estudo global dos intercambios de carbono entre o océano e a atmosfera.

Ao mesmo tempo que avanzaban os estudos dos fluxos superficiais, desenvolvíanse novas metodoloxías destinadas a cuantificar o carbono antropoxénico almacenado no interior do océano. Este problema representaba un dos grandes desafíos da oceanografía química moderna. O dióxido de carbono procedente das actividades humanas é indistinguible desde o punto de vista químico do carbono presente de forma natural na auga de mar. Por este motivo, a súa

Aida no seu laboratorio do Instituto de Investigacións Mariñas de Vigo no ano 2012

cuantificación require o desenvolvemento de aproximacións indirectas baseadas en relacións bio-xeoquímicas, trazadores conservativos e modelos de circulación.

Aida participou activamente neste esforzo colectivo internacional. Un fito especialmente relevante foi a súa contribución no artigo publicado en *Science* en 2004 por Sabine e colaboradores. Este traballo proporcionou a primeira estimación global do carbono antropoxénico acumulado no océano e demostrou que unha fracción substancial das emisións xeradas pola actividade humana fora absorbida polas augas oceánicas. O resultado puxo de manifesto o papel esencial do océano

como amortecedor do cambio climático e modificou profundamente a comprensión do ciclo global do carbono.

A relevancia deste descubrimento vai máis aló da simple cuantificación dun inventario. Ao absorber unha parte significativa das emisións antropoxénicas, o océano reduciu a velocidade de acumulación de CO_2 na atmosfera e atrasou parcialmente os impactos máis inmediatos do cambio climático. Con todo, esta función reguladora ten tamén consecuencias sobre a química mariña, que posteriormente se convertería nun dos principais focos de investigación de Aida.

A partir de entón, unha parte importante do seu traballo centrouse na distribución, transporte e almacenamento do carbono antropoxénico no Atlántico Norte e Sur. As seccións hidrográficas repetidas permitiron seguir a evolución temporal dos inventarios de carbono e analizar o papel da circulación oceánica na súa redistribución. Estes estudos demostraron a importancia do Atlántico como unha das principais rexións de almacenamento de carbono antropoxénico do planeta e contribuíron a comprender a relación entre circulación oceánica e cambio climático.

O conxunto destes traballos conduciu a unha visión integrada da chamada bomba de carbono oceánica. Este concepto engloba os procesos físicos, químicos e biolóxicos responsables da absorción e almacenamento de dióxido de carbono no océano. A bomba biolóxica, baseada na produción de materia orgánica polo fitoplancto; a bomba de solubilidade, ligada á disolución do CO_2 e á circulación termohalina; e a bomba de carbonato, asociada á formación e sedimentación de carbonato cálcico, constitúen mecanismos complementarios que conectan a superficie oceánica co océano profundo.

Comprender o funcionamento destes procesos converteuse nun elemento central para avaliar a resposta futura do océano ao incremento das emisións antropoxénicas. Os estudos en que participou Aida puxeron de manifesto que posibles cambios na circulación meridional do Atlántico poderían modificar a capacidade de absorción e almacenamento de carbono do océano, e describiron retroalimentacións capaces de amplificar os efectos do cambio climático global.

A acidificación oceánica constitúe unha das consecuencias máis directas e, ao mesmo tempo, menos visibles da acumulación de dióxido de carbono antropoxénico na atmosfera. A medida que o océano absorbe parte deste CO_2, prodúcense modificacións progresivas na química da auga de mar,

particularmente no sistema do carbonato. Como resultado, diminúe o pH e redúcese a concentración de ións carbonato, unha compoñente esencial para numerosos organismos mariños calcificadores.

A diferenza doutros impactos ambientais máis evidentes, a acidificación oceánica é un proceso silencioso. Os cambios observados nun período de poucos anos adoitan ser pequenos en comparación coa variabilidade natural do océano. Por este motivo, a súa detección require medidas extremadamente precisas, metodoloxías harmonizadas e observacións sostidas durante longos períodos de tempo. Foi neste escenario de esixencia analítica e observacional onde o labor científico de Aida Fernández Ríos deixou unha pegada especialmente significativa.

Ao longo das últimas décadas, Aida participou activamente en campañas oceanográficas repetidas e en grandes programas internacionais orientados á observación do sistema do CO_2 mariño. Estes esforzos permitiron construír bases de datos de referencia internacional e contribuíron á harmonización de observacións realizadas por diferentes grupos de investigación. Iniciativas como CARINA e os programas posteriores de síntese de datos oceánicos constituíron ferramentas esenciais para

Aida co coeditor deste libro, Gabriel Rosón, na illa de Tenerife,
antes da campaña WOCE-A5 (1992)

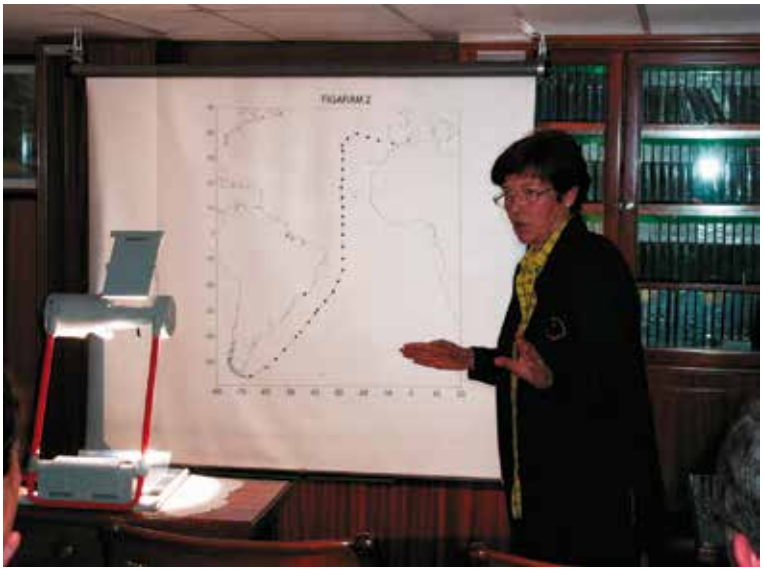
identificar tendencias a longo prazo e avaliar a evolución do océano fronte ao incremento continuado das emisións antropoxénicas.

Os resultados destas investigacións demostraron que a acidificación non se limita ás capas superficiais do océano. A través da ventilación e da circulación das masas de auga, o sinal químico asociado ao CO_2 antropoxénico propágase progresivamente cara ao interior, alcanzando augas intermedias e profundas. Esta observación resultou especialmente relevante no Atlántico Norte, unha rexión clave na absorción e redistribución do carbono debido ao seu papel central na circulación meridional do Atlántico.

O estudo destas transformacións culminou nunha das contribucións científicas máis recoñecidas de Aida. No traballo publicado en 2015 nos *Proceedings of the National Academy of Sciences*, coincidindo coa súa incorporación á Real Academia Galega de Ciencias, demostrouse que a acidificación podía seguirse ao longo das rutas de circulación das masas de auga do Atlántico Norte. O estudo permitiu separar a contribución específica do CO_2 antropoxénico da variabilidade natural do sistema e cuantificar o impacto do carbono de orixe humana sobre diferentes masas de auga.

Os resultados evidenciaron que a diminución do pH non constitúe un fenómeno restrinxido á superficie oceánica, senón unha transformación química que afecta progresivamente ao interior do océano. Ademais, puxeron de manifesto que distintas masas de auga responden de maneira diferente ao incremento do CO_2 antropoxénico, tanto en intensidade como en escala temporal. Este traballo converteuse nunha referencia internacional e contribuíu de maneira significativa a consolidar a acidificación oceánica como un dos indicadores fundamentais do cambio global.

A importancia destas investigacións transcende o ámbito estritamente académico. A acidificación afecta procesos biolóxicos básicos e pode modificar o funcionamento dos ecosistemas mariños, especialmente daqueles organismos que utilizan carbonato cálcico para formar estruturas esqueléticas ou de protección. Comprender a súa evolución constitúe, por tanto, unha prioridade científica e social de primeira orde. Neste sentido, os traballos de Aida contribuíron non só a describir un fenómeno emerxente, senón tamén a establecer as bases observacionais necesarias para avaliar a súa evolución futura.



Aida presentando os resultados científicos da campaña FICARAM-2, que cruzou o Atlántico desde o estreito de Xibraltar ata o cabo de Hornos

Aida durante a lectura do seu discurso inaugural como membro da Real Academia Galega de Ciencias (RAGC) (2015), titulado «Acidificación dos océanos, consecuencia das emisións de CO_2»

Paralelamente á súa intensa actividade investigadora, Aida desenvolveu un importante labor de xestión e liderado científico. Entre 2006 e 2011 exerceu como directora do Instituto de Investigacións Mariñas do CSIC, converténdose na primeira muller en ocupar este cargo. Esta responsabilidade representou a culminación dun percorrido profesional singular dentro da institución, iniciada décadas antes como técnica de laboratorio e desenvolvida posteriormente como investigadora, responsable científica e referente internacional da oceanografía química.

A súa etapa como directora estivo marcada por unha visión estratéxica orientada ao fortalecemento institucional. Impulsou a elaboración do Plan Estratéxico do centro, promoveu a consolidación de servizos científico-técnicos compartidos e apoiou a modernización de infraestruturas fundamentais para a investigación mariña. Entre outras iniciativas, reforzouse a instrumentación científica asociada ás campañas oceanográficas, consolidáronse servizos de apoio á investigación e impulsáronse mecanismos destinados a mellorar a coordinación interna e a eficiencia da actividade científica.

Un aspecto especialmente destacado do seu liderado foi a atención prestada ao persoal técnico e aos servizos de apoio. A experiencia adquirida durante os seus primeiros anos de carreira permitiulle comprender mellor ca ninguén a importancia destas funcións para o desenvolvemento da investigación. Aida defendía que a excelencia científica non depende exclusivamente das ideas ou dos proxectos, senón tamén da existencia dunha estrutura técnica e humana capaz de sostelas ao longo do tempo.

O seu estilo de dirección caracterizouse pola procura do consenso, pola capacidade de escoita e por unha notable habilidade para integrar puntos de vista diferentes. As persoas que traballaron con ela destacan a súa capacidade para combinar firmeza e empatía, así como a súa preocupación constante por crear un ambiente de cooperación entre grupos, disciplinas e xeracións distintas de investigadores/as.

Esta dimensión institucional complementa e amplía o significado da súa obra científica. Aida contribuíu non só a producir coñecemento, senón tamén a crear as condicións necesarias para que ese coñecemento se puidese seguir xerando no futuro. A súa influencia deixouse sentir tanto nos avances da oceanografía química como no fortalecemento das estruturas científicas que fixeron posible eses avances.

En conxunto, a traxectoria de Aida Fernández Ríos pode interpretarse como unha evolución coherente desde o estudo da produtividade costeira das rías galegas ata a comprensión dos grandes

Aida co coeditor deste libro, Fiz Fernández, en Islandia,
despois da campaña OVIDE (2006)

cambios bioxeoquímicos que afectan o océano global. A través dunha combinación pouco común de rigor experimental, capacidade de observación e visión integradora, axudou a conectar procesos locais e globais e a situar a investigación mariña desenvolvida en Galicia dentro dos grandes programas internacionais da oceanografía contemporánea.

Os capítulos que compoñen este libro permiten percorrer con maior detalle as distintas etapas desta traxectoria. Neles aparecen a investigadora que participou na revisión da estequiometría da materia orgánica mariña, a oceanógrafa que participou na caracterización das masas de auga do Atlántico, a científica que axudou a cuantificar o carbono antropoxénico almacenado no océano e a investigadora que participou nos primeiros estudos capaces de documentar a acidificación do océano profundo. Mais aparece tamén a directora, a mentora, a compañeira e a amiga.

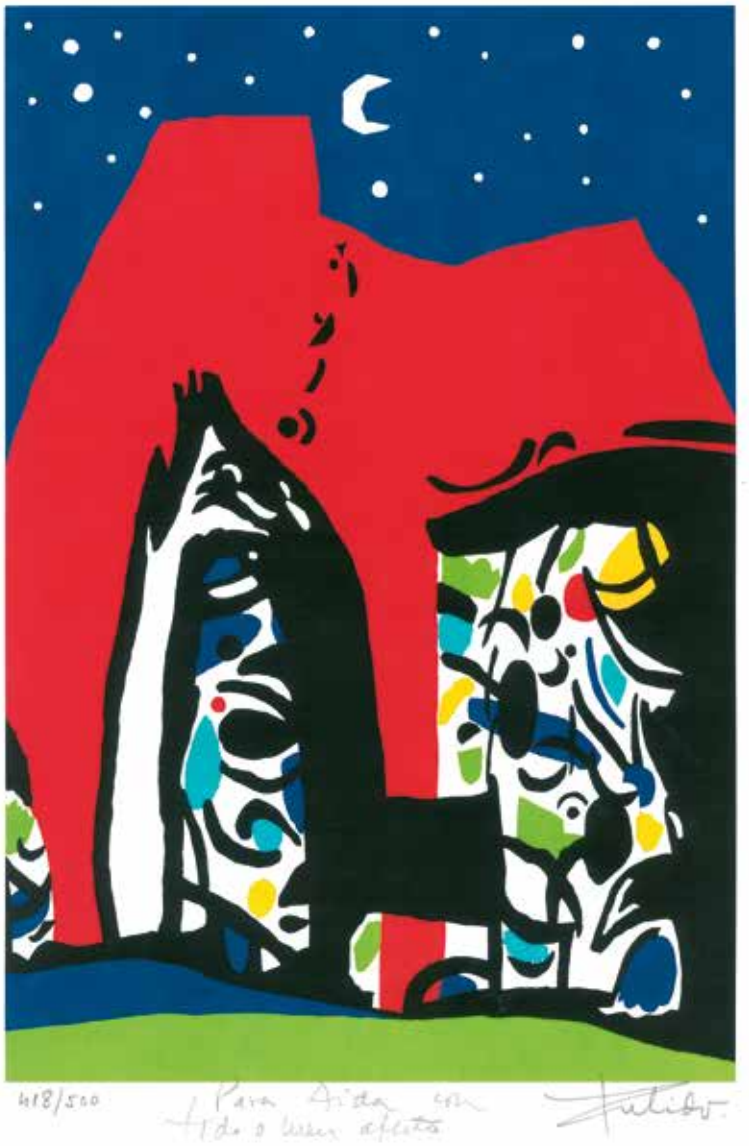
A través dos testemuños e das contribucións reunidos nestas páxinas descóbrese unha personalidade científica e humana singular. A curiosidade intelectual, a capacidade de traballo, a xenerosidade coas persoas máis novas, o respecto polo labor técnico e a confianza na cooperación como motor do progreso científico constitúen trazos recorrentes en moitas das experiencias aquí relatadas. Colaboradores e colaboradoras de diferentes países coinciden ademais en salientar a súa capacidade para crear vínculos duradeiros entre persoas e institucións, pois favoreceu a cooperación científica internacional e impulsou a construción de redes de observación e investigación que seguen activas na actualidade.

O legado de Aida Fernández Ríos non reside unicamente nos artigos científicos que publicou, nos proxectos que liderou ou nas campañas oceanográficas nas que participou. Permanece tamén nas persoas que formou, nas institucións que axudou a fortalecer e nas liñas de investigación que axudou a consolidar. A súa obra representa un exemplo de como a observación rigorosa, sostida durante décadas, pode transformar datos en coñecemento e converter preguntas locais en respostas relevantes para comprender o funcionamento do sistema Terra.

Poucas traxectorias representan tan ben a evolución da oceanografía contemporánea: desde o estudo da produtividade das rías galegas ata a comprensión da acidificación do océano global; desde a precisión dunha medida individual ata a construción de sistemas internacionais de observación capaces de revelar os cambios do planeta. Nesa capacidade para conectar escalas, disciplinas e persoas reside unha parte esencial do seu legado científico e humano.

Fiz Fernández Pérez
Profesor de investigación do CSIC e académico numerario da RAGC

Gabriel Rosón Porto
Catedrático da Facultade de Ciencias do Mar (Universidade de Vigo)



Debuxo de Antón Pulido dedicado á súa amiga Aida Fernández Ríos

Aida Fernández Ríos: a ciencia como vocación, a vida como legado

Miguel Ángel Fernández Fernández

Cando se fala da doutora Aida Fernández Ríos, a maioría das persoas evoca a bióloga brillante que foi e todo o que aínda podería ofrecer se un tráxico accidente no ano 2015 non interrompese a súa traxectoria.

Isto é o que pensaría a xente de fóra. Pero para os familiares, ante todo, era Aida, unha muller cuxa simpatía e alegría contaxiosa unían á familia. Sempre presente, sempre xenerosa, sempre cun cariño inmenso cara aos demais. *La Voz de Galicia* nun artigo do 19 de febreiro de 2026 dicía o seguinte dela: «Amable, xenerosa, rigorosa, concienciuda, decidida e entregada a un traballo polo que sentía unha enorme paixón tras unha vocación tardía. Foi un exemplo de superación», así era a nosa Aidiña (como se refería a ela a súa irmá Elisa).

Aida cun ano

A familia fomos testemuñas de excepción do seu percorrido. Vimos como unha carambola do destino a conduciu cara a unha meta para a que tivo que transitar un camiño difícil. Compartimos os seus sacrificios, as súas alegrías e as súas frustracións e, tamén, fomos testemuñas da súa gran tenacidade.

Aquí non falaremos da súa traxectoria científica, falaremos dunha Aida afastada de laboratorios e buques oceanográficos, da muller que, sen pretendelo, deixou unha pegada indeleble nos que tivemos a sorte de compartir a súa vida e quererlle.

Aida nos brazos do seu pai, cos seus pais e irmás. De esquerda a dereita: a súa irmá Elisa, a súa nai Elisa, o bebé é a súa irmá pequena Marisol, a súa irmá Loli, o seu pai Albino e Aida

Primeiros anos

Aida Fernández Ríos naceu en Vigo o 4 de marzo de 1947 na rúa Tomás A. Alonso 44-3º. Era a terceira de catro irmás (Elisa, Loli, Aida e Marisol), fillas de Albino Fernández Vila (natural do Grove) e de Elisa Ríos Casal (nacida en Vigo). Nunha entrevista de 2012 afirmaba que «o mundo do mar estivo sempre moi presente a través deles». O seu pai procedía dunha familia de pescadores e a súa nai tiña numerosos familiares vinculados co mar, unha contorna que Aida sempre destacou como parte esencial da súa identidade.

O seu pai, Albino, era un home culto e excelente conversador, malia proceder dunha familia de pescadores cunha boa situación económica. A súa formación intelectual desenvolveuse grazas á amizade co fillo do médico do Grove, que lle recomendaba lecturas, lle prestaba libros e o invitaba a participar nos faladoiros do Casino. Naquela época, el traballaba como axudante de xastre e un día un comercial que o visitaba quedou sorprendido pola súa cultura e animouno a trasladarse a Pontevedra para prosperar, pois O Grove «quedáballe pequeno». Alí traballou como vendedor de máquinas de coser e, máis adiante, xa en Vigo, como xerente dunha fábrica de xeo. Aida lembraba o trato respectuoso e humano que o seu pai tiña cara aos seus traballadores.

A súa nai, Elisa, criouse cunha tía sen fillos e foi educada como unha señorita da época. Era unha muller avanzada para o seu tempo: contaba que ela e Miss Vigo eran as únicas mulleres que conducían. Tamén facía fotografías e revelábaas persoalmente, pois non quería que ninguén máis as vise. Valente e decidida, casou con Albino en contra da opinión da súa tía. Elisa era alegre, sociable e xenerosa; moitos acudían a ela en busca de consello pola súa grande empatía.

Durante a infancia de Aida, a casa familiar acolleu a miúdo parentes do Grove que pasaban longas tempadas alí. Entre eles, a súa prima Mariló, que viviu moitos anos no fogar para poder estudar en Vigo e que se converteu nunha irmá máis.

Aida foi sempre unha nena risoña, curiosa e moi creativa. As súas irmás lembraban anécdotas que revelaban o seu carácter: como aquela vez en que, sendo moi pequena, se escoitou un ruído no corredor e a atoparon bebendo auga dun prato de porcelana «para saber como bebían os gatos». Ou cando durante unha longa parada do tranvía comezou a rir e a repetir con lingua

Escola de dona Julita. Aida (5ª da primeira fila pola esquerda)
e a súa irmá Loli (5ª da terceira fila)

Aida na preparatoria 1957-1958

Aida con dez anos na súa etapa no Instituto Santa Irene

Curso 4º B - Instituto Santa Irene. 16 de maio de 1962.
Aida é a primeira da segunda fila

de trapo «non anda, non anda», contaxiando o riso a todos os pasaxeiros e pasaxeiras. Tiña unha enerxía positiva que facía sorrir aos que a rodeaban.

A creatividade de Aida non tiña límites. Se desexaba un xoguete, construíao. Fabricou unha máquina de escribir con teclas móbiles que imitaban o son real: un teléfono, un tocadiscos e outros inventos infantís que sorprendían á súa familia.

A súa vida académica comezou aos tres anos na escola de dona Julita, onde permaneceu ata os dez. Lembraba que a mestra lles facía recitar a táboa de multiplicar completa mentres lle daba de comer ao seu fillo pequeno, Roris. Nesa etapa, detectáronlle unha enfermidade pulmonar. Continuou os seus estudos no Instituto Santa Irene, onde obtivo o bacharelato elemental en 1962. Posteriormente, ingresou na Escola de Comercio para cursar Peritaxe Mercantil, estudos que non chegou a finalizar. Aos 17 anos comezou a traballar na imprenta Utrella.

EJEMPLAR PARA SECRETARIA

ESCUELA MUNICIPAL DE ARTES Y OFICIOS DE VIGO

MATRICULA - CARNET

NOMBRE Aida de la Aurora

APELLIDOS Fernández Rico

hija de Albino y de Elisa

natural de Vigo provincia de Pontevedra

de 21 años, de profesión administrativa

domiciliada en la calle de Conde A.Alonso

número 44 piso tercero solicita matrícula en las asignaturas siguientes:

1.— Dibujo de Figura y Adorno

2.—

3.—

4.—

5.—

6.—

Vigo, 26 de setiembre de 196[illegible]

La interesada,

Aida Fdez

Núm. de la matrícula 17

Ficha da matrícula na Escola de Artes e Oficios

En 1970 a familia trasladouse ao Camiño da Gándara 53-2º en Vigo. Este domicilio foi testemuña do ascenso de Aida ata converterse nunha científica de referencia. A súa contorna animouna sempre a continuar formándose e ela compaxinou o seu traballo coas clases de Debuxo na Escola de Artes e Oficios e como delineante.

Pertenceu aos Montañeiros Celtas e desenvolveu un amor pola montaña que a acompañaría toda a súa vida. Por iso decidiu construír unha casa en Tomiño (Pontevedra), onde era habitual que

Carmen Mouriño e Aida Fernández a bordo do García del Cid
en novembro de 1983 fronte á cidade da Coruña

realizase rutas de sendeirismo. Para Aida, ir a Tomiño era desconectar: alí celebraba cada 25 de Xullo —Día da Patria Galega— con familia e amizades. Cando recibía visitas de colegas de profesión, invitábaos a pasar fins de semana na súa casa e levábaos a coñecer os muíños do Folón, os petróglifos do monte Tetón e outros lugares que lle apaixonaban.

Tamén estudou francés na Alianza Francesa xunto coas súas amigas da infancia Esther e Amparo, e foi alí onde coñeceu a persoa que cambiaría a súa vida: Carmen Mouriño Sabucedo, coñecida por todos como Carmiña.

Ela traballaba no entón Instituto de Investigaciones Pesqueras —futuro Instituto de Investigacións Mariñas (IIM)— e animou a Aida a presentarse ás oposicións do CSIC. Entre ambas as dúas naceu unha relación estreitísima que durou ata a morte prematura de Carmiña en 1986, un golpe devastador para Aida. Sempre a lembrou con cariño e mantivo o vínculo coa súa familia.

Unha novísima Aida co seu pai en Santa Cristina de Lavadores

Aida (2ª pola dereita) coas súas irmás
e sobriños. Ano 1968

Instituto de Investigaciones Pesqueras

En 1972, con 25 anos, aprobou as oposicións de auxiliar de investigación. Alí atopou a súa verdadeira vocación, ata o punto de que se matriculou en clases nocturnas para obter o bacharelato superior (ela xa tiña o acceso á universidade para maiores de 25 anos, pero para estudar a carreira valorou que era mellor ter a base de coñecementos do bacharelato) no antigo Instituto Feminino, sito en Gran Vía, ao lado do Santa Irene.

Posteriormente, cursou a licenciatura de Bioloxía. Naquela época realizábanse os tres primeiros anos no actual campus universitario de Vigo (CUVI) para finalizar os dous últimos anos en Santiago. Por motivos laborais, ela non podía asistir ás clases, polo que se reuniu co seu profesorado para explicarlle as súas circunstancias e chegaron ao acordo de que só iría ás clases que fosen imprescindibles. As prácticas da carreira fíxoas á conta das súas vacacións. E todo iso sen abandonar o seu traballo no IIM. Naquel entón tamén saía de campaña e Belén e Celia (compañeiras da carreira) axudáronlle moito pois pasábanlle os apuntamentos e, cando tiña que durmir en Santiago, quedaba na súa casa. Esa amizade durou toda a vida.

Foi unha etapa en que a familia fomos testemuñas de excepción dos moitos sacrificios realizados para sacar adiante a súa carreira. Era unha traballadora incansable, pero tamén sabía pasalo ben e sempre tiña tempo para todas as persoas ás que quería. Naquela época, a casa estaba en silencio, todos eramos conscientes do esforzo que realizaba e procurabamos non facer ruído porque sabiamos da importancia que tiña para ela a concentración nos seus estudos. Todo ese sacrificio tivo a súa recompensa cando conseguiu a licenciatura. Nós tamén nos sentiamos parte dos seus logros, xa que ela sempre nos facía partícipes e os celebraba connosco. Para ela, a súa familia e os seus amigos eran o que máis lle importaba.

Logo continuou coa tese de doutoramento (*El fitoplancton en la Ría de Vigo y sus condiciones ambientales*), dirixida polo doutor Fernando Fraga Rodríguez. O doutor Fraga foi sempre unha persoa moi importante e un referente, e sempre falaba del con moito cariño e admiración. Creo que lle daba tranquilidade e seguridade. Tanto é así que, cando a nomearon membro da Real Academia, foi recollelo para ir a Santiago, pois tiña claro que só quería ir con el.

Tras obter o doutoramento *cum laude* en 1992, fomos toda a familia a celebralo cunha comida e a súa irmá maior pronunciou o seguinte discurso:

> Aida, hoxe quero, e queremos, alzar a nosa copa porque somos felices, estamos alegres e contentos, pois celebramos algo tan importante como é o teu doutoramento. Sabes que nós tiñamos a ilusión e a confianza en que o lograrías. O noso alento acompañoute sempre, como tamén estaban contigo o espírito de Carmiña e o de papá. O esforzo puxéchelo ti e cun bo adestrador (o Dr. Fraga) chegaches á meta e conseguiches o teu ouro (o CUM LAUDE). Nós, os teus seareiros, aplaudímoste.
>
> Brindamos para que na túa carreira cultives moitos éxitos. Brindamos para que na nosa familia haxa momentos tan entrañables coma este e que nunca nos falte o diálogo, a comprensión, como ata este día.
>
> Brindamos tamén para que, se algún día falta algún dos que estamos, saibamos co noso recordo facer que estean presentes.
>
> Felicidades, Aida, desexamos que sigas mirando con amor a vida cada mañá ao espertar e cada noite ao caer, que nunca deixes de descubrir a beleza das pequenas cousas e —como dicía Quilón, un dos setes sabios de Grecia— que consigas o máis difícil: gardar un segredo, empregar ben o lecer e sufrir inxurias.
>
> Querémoste.

A nosa Aida foi avanzando na súa carreira investigadora: obtivo primeiro praza como científica titular e, posteriormente, como investigadora científica, ata converterse en profesora de investigación do IIM.

En 2006 converteuse na primeira muller en dirixir o IIM, labor que desempeñou ata 2011. Aida é das poucas científicas de España que empezou desde o posto de auxiliar de investigación e foi subindo ata chegar ao máis alto. Poucos científicos e científicas poden presumir disto. As persoas que traballaron con Aida coinciden en que, ao pasar por todas as categorías laborais, coñecía de primeira man as necesidades de cada departamento e a súa opinión neste tema era incontestable.

A familia fomos partícipes de todos os seus sacrificios, traballo e constancia, pero descoñeciamos todo o que achegaría á ciencia ata o seu pasamento. Sabía diferenciar perfectamente a súa profesión da súa vida privada. Facíanos algún comentario relacionado co seu traballo: «os mexillóns son os porquiños do mar (comen de todo), non comades mexillóns que hai marea vermella, o peixe espada ten moito mercurio», e outros comentarios similares. Sabiamos que ía de campaña, tamén falaba das súas viaxes a Brest, a congresos, a dar cursos; que dirixía ou formaba parte dalgún tribunal de tese de doutoramento e algunha cousa máis.

Unha vez estiveron a piques de evacuala en helicóptero por un herpes zóster. Tamén nos comentaba que na Antártida non podían achegarse aos pingüíns porque os podían estresar e que os glaciares, dependendo da luz do sol, eran de diferentes cores. Do barco comentábanos o ben que o pasaba no comedor, de que no Hespérides cando ía de xefa de campaña tiña que comer co capitán e cos mandos, pero ela pasábao mellor cos mariñeiros. Cando foi a Australia contábanos como se subiu a unha árbore altísima que tiña uns ferros cravados ao tronco e unha corda para suxeitarse (para espanto da súa nai e a súa irmá maior, escandalizadas pola ousadía da súa Aidiña).

Cos Rikishi (homes de forza) cando foi a un combate de sumo no Xapón

Tamén comentaba que, durante a súa estadía no Xapón, non se decataba dos sinais de entrada e saída cando foi a un combate de sumo e que a comida xaponesa era riquísima. Sempre narraba anécdotas e vivencias. Pouco falaba, polo contrario, das campañas en que participaba. Só se saíran ben e pouco máis.

Non se consideraba importante e era unha persoa sinxela, sen alardes. Isto non impedía que se entusiasmase cando nun congreso unha relatora a mencionaba e se sorprendese co recibimento cando chegaban a porto co Hespérides. Tamén nos falou de cando foi aos premios Cervantes e do ben que andaba a futura raíña Letizia con tacóns; así era ela...

Do que si falaba, en familia, era de Gaspar. Un proxecto que desenvolveu cun enxeñeiro da Universidade de Vigo e que consistía nun dispositivo que ían poñer aos barcos que facían sempre as mesmas rutas e ían collendo mostras de auga para posteriormente analizalas. Con este sistema estaba realmente entusiasmada polo que podía significar para as investigacións mariñas.

Aida escribiu máis de cen artigos publicados nas revistas científicas máis prestixiosas (disto decatámonos despois). Era moi frecuente cando chegabas á súa casa un domingo vela diante do portátil cotexando uns datos con Fiz Fernández Pérez e dicir «espera que termino isto e xa estou». Era unha traballadora incansable que gozaba e vivía todo o que facía. Fiz tamén foi unha persoa moi importante na súa vida, tanto no laboral como no privado; el era o seu irmán, o seu amigo. Por algo sería que no instituto lles chamaban Zipi e Zape.

O 2015, ano da súa morte, foi tamén o seu grande ano. O 18 de xuño de 2015, seis meses antes do seu falecemento, ingresou na Real Academia Galega de Ciencias como académica numeraria na entón denominada Sección de Farmacia e Bioloxía e converteuse na terceira muller en incorporarse á institución. Pronunciou o seu discurso titulado «La acidificación del mar: una consecuencia de las emisións de CO_2» e foi un día moi emocionante para todos. A familia tivo no pensamento os seus pais e o orgullosos que estarían dos logros da súa Aidiña. Familiares e amigos desprazáronse a Santiago de Compostela, onde tivo lugar o acto. Foi un día feliz e inesquecible.

Pouco tempo despois, familia e amizades rendémoslle unha homenaxe privada na que a agasallamos como merecía. Foi unha sorpresa coa que se emocionou e alí estabamos todos: a súa familia, os seus amigos e amigas da infancia, das casas rosadas, da Escola de Comercio, da facultade, das Mulleres Destacadas, dos Vigueses Distinguidos, os seus compañeiros e compañeiras de traballo. Na comida proxectouse un vídeo en que persoas de todas as partes do mundo que a coñecían a felicitaban cun gran cariño polo seu ingreso na Real Academia Galega de Ciencias.

Foi un día que todos os que formamos parte da súa vida lembraremos sempre. Estaba feliz, abrazando a todo o mundo como a ela lle gustaba. Ao lembrar aquel día, a pesar da pena que nos deixou o seu falecemento, a todos se nos escapou un sorriso, mesmo amigos aos que facía anos que non vía puideron despedirse dela sen saber que sería a última vez.

Epílogo

Ao mirar cara atrás, un comprende que a vida de Aida Fernández Ríos, filla, irmá, tía e amiga, non pode medirse soamente polos seus logros científicos, por moi extraordinarios que foron e que son. O seu legado máis profundo non está unicamente nos artigos publicados, nas campañas oceanográficas ou nos recoñecementos que recibiu, senón na pegada silenciosa que deixou en quen a coñeceu e a quixo.

Aida foi unha muller que nunca se rendeu ante as dificultades, que avanzou desde o lugar máis humilde da escala ata o máis alto sen perder a proximidade, a humanidade nin o sentido do humor. A súa historia demostra que a vocación pode chegar tarde pero que, cando chega, o ilumina todo. E que a ciencia, cando se vive como ela a viviu, non é só un traballo, senón unha forma de estar no mundo.

A súa ausencia deixou un baleiro imposible de encher, pero tamén unha certeza: a de que a súa vida, intensa e luminosa, nos segue acompañando. En cada recordo familiar, en cada conversación entre colegas, en cada mozo investigador que atopa inspiración no seu exemplo, Aida continúa e continuará presente. Estamos convencidos diso.

Este traballo non pretende pechar nada, porque as vidas que importan non se pechan. Só quero deixar constancia como sobriño seu do que foi evidente para todos nós: que a doutora Aida Fernández Ríos non só fixo ciencia, senón que alegrou as nosas vidas. E que, mentres alguén a lembre, ela seguirá viva. E a nosa Aida sempre permanecerá no noso recordo.

Grazas por todo Aidiña, alá onde esteas.

Ciencia e compromiso: Galega Destacada (2002)

María Concepción Villanueva Ruiz
Licenciada en Economía de Empresa e Socioloxía. Exerceu como auditora de contas e asesora empresarial

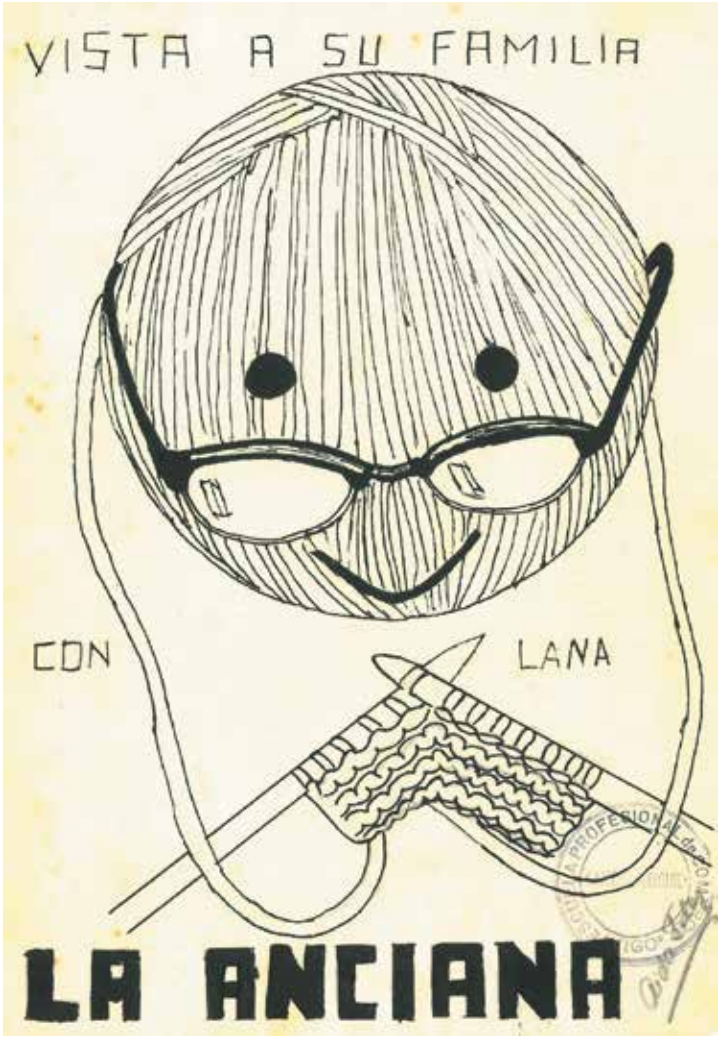
Rosa Fontaíña Pazos
Fundadora da Rede de Mulleres Veciñais contra os Malos Tratos de Vigo

Non foi casualidade que Aida Fernández Ríos fose recoñecida como Galega Destacada no ano 2002. Aquel febreiro, no acto anual de homenaxe a Concepción Arenal promovido pola asociación de mulleres Diálogos 90, a súa traxectoria científica e humana quedou simbolicamente inscrita nunha tradición de loita por un futuro máis xusto, máis consciente e máis solidario. Aida compartiu aquel recoñecemento con Xoana Torres e coa Rede de Mulleres contra a Violencia de Xénero, nun encontro en que ciencia, cultura e compromiso social dialogaron con forza diante da cidade.

Aquel acto non foi só unha cerimonia institucional nin unha simple suma de méritos individuais. Foi, sobre todo, a expresión dunha vontade colectiva: poñer en valor os camiños diversos polos que as mulleres contribúen ao coñecemento, á cultura e á defensa da dignidade humana. Neste contexto, a figura de Aida representaba con claridade a unión entre coñecemento rigoroso e responsabilidade ética.

Para os que a coñeciamos desde moito antes, aquel recoñecemento fixo visible ante a sociedade unha coherencia vital que xa viña de lonxe. O contacto con Aida remontábase aos anos sesenta, cando estudaba Peritaxe Mercantil na Escola de Comercio e comezaban a debuxarse traxectorias vitais que, aínda sen sabelo, acabarían cruzándose de novo co paso do tempo. Xa daquela destacaba pola súa inquietude intelectual, pola súa curiosidade insaciable e por unha maneira moi persoal de habitar os espazos académicos.

Era unha estudante brillante e unha compañeira repleta de vida. Enchía corredores e aulas de risas, e transformaba os días monótonos nun escenario compartido de complicidade. Mesmo nos rituais máis ríxidos sabía atopar ocasión para o humor. Aínda lembramos aquel profesor de francés que, en vez de pasar lista, nos obrigaba a recitar correctamente o número asignado. Aida divertíase especialmente cando el repetía con insistencia os números máis difíciles, como o meu condenado



Debuxo publicitario.
Aida deixaba pegada tamén coa súa creatividade, a que reflicten os seus traballos para a materia «onde sempre destacaba con debuxos eficaces e divertidos»

trece, prolongando aquel «treesss» que retumbaba pola aula e que acabou por quedar gravado na memoria de todas nós.

A súa creatividade manifestábase con especial forza nos traballos de Debuxo Publicitario. Aida tiña unha capacidade notable para sintetizar ideas, ordenar mensaxes e facelo cunha expresividade eficaz e chea de humor. Aquel gusto pola composición visual, pola claridade e pola forza simbólica non foi unha aptitude circunstancial. Co paso do tempo, converteríase nun fío silencioso pero constante do seu xeito de facer ciencia.

As relacións persoais daquela etapa non foron intensas nin prolongadas. Os camiños separáronse cedo. Mentres unhas continuaban a súa formación, Aida tivo que compaxinar estudos e traballo tras a morte do seu pai. Traballou nunha imprenta e seguiu formándose como podía, demostrando xa entón unha fortaleza pouco común. Xunto ao esforzo, había sempre nela unha atención xenerosa cara aos demais, unha disposición a coidar que acabaría formando parte da súa identidade máis fonda.

O reencontro produciuse moitos anos despois, nun momento en que Aida xa tiña consolidada unha traxectoria científica de gran relevancia. Regresaba dunha campaña oceanográfica no buque Hespérides, na que exercera como xefa de campaña nun estudo sobre a captación de carbono no océano Atlántico. Celebraba o regreso á terra polas rúas da cidade vella de Vigo, cun humor que comparaba aquela volta co ritual dos patróns de pesca antes de render contas co armador.

Falaba con entusiasmo do traballo no mar, das noites de navegación, da responsabilidade de investigar nun planeta cada vez máis ferido e da urxencia de comprender os procesos de carbonización e acidificación dos océanos, tan estreitamente ligados á nosa maneira de vivir. Contaba tamén como, grazas ás novas formas de comunicación en rede, podían manter contacto constante con outros equipos científicos mesmo desde o barco, o que favorecía un avance acumulativo e compartido. A ciencia, para Aida, era esencialmente unha tarefa colectiva.

Mesmo nas campañas máis esixentes, sabía introducir un compoñente lúdico. Levaba consigo a música de Joaquín Sabina, ao que adoraba, e facía soar unha e outra vez «19 días y 500 noches» durante as travesías. As cancións eran escoitadas, recitadas e comentadas en grupo, como un

ritual compartido. Co seu estilo tan pouco dogmático, repetía a miúdo, entre risas: «Como te digo una 'co', te digo la 'o'». Aquela frase, tan súa, definía ben unha maneira de vivir sen absolutismos, aberta e gozosa.

Foi nesas conversas cando relatou o seu camiño pouco convencional cara á ciencia. Animada por Carmen Mouriño, investigadora do Instituto de Investigaciones Pesqueras, presentouse ás oposicións de auxiliar de investigación e incorporouse ao instituto en 1972. Aquel espazo foi decisivo. Alí descubriu o laboratorio e a bioloxía mariña como un territorio onde a súa curiosidade e a súa disciplina podían camiñar xuntas.

Non ter cursado bacharelato superior non a detivo. Inscribiuse nos estudos para maiores de 25 anos na UNED, completou o bacharelato nocturno no Instituto San Tomé, licenciouse en Bioloxía e defendeu a súa tese en 1992, mentres investigaba, publicaba e avanzaba no CSIC. Un día, case como quen xoga, viu anunciada unha convocatoria de oposicións e preguntouse: «Por que non presentarme?» Presentouse e aprobou.

A súa maneira de facer ciencia estaba profundamente marcada pola comunicación e polo coidado do proceso compartido. A sensibilidade gráfica desenvolta na xuventude reaparecía agora transformada en capacidade para ordenar datos, elaborar esquemas, facer comprensibles procesos complexos e favorecer unha comunicación clara dentro dos equipos. Para Aida, investigar non consistía só en descubrir, senón tamén en saber contar, saber compartir e facer accesible o coñecemento.

No seo de Diálogos 90, a súa traxectoria foi recoñecida como merecente do nomeamento de Galega Destacada no ano 2002. A elección foi unánime, porque Aida encarnaba unha maneira de exercer a ciencia comprometida co seu tempo, consciente das súas responsabilidades sociais e ambientais. No acto de entrega, celebrado tras a ofrenda floral a Concepción Arenal, púxose de relevo a necesidade de unir ciencia e cultura, ámbitos que nela nunca estiveron separados.

Desde o eido do activismo social, aquel acto viviuse tamén como unha afirmación colectiva. A presenza conxunta de Aida Fernández Ríos, Xoana Torres e da Rede de Mulleres contra a Violencia de Xénero fixo visible unha idea esencial: que o coñecemento, a creación cultural e a loita social

As galegas destacadas premiadas en 2002: Aida Fernández Ríos, Rosa Fontaíña e Xoana Torres (representada por Laura Pérez-Landeira), xunto cos alcaldes de Vigo e Ferrol

forman parte dun mesmo impulso transformador. Non se trataba só de recoñecer traxectorias, senón de afirmar valores compartidos.

A partir dese momento, a amizade e os vínculos fortalecéronse. Houbo máis encontros, proxectos compartidos e outro recoñecemento cargado de simbolismo: o ingreso de Aida na Real Academia Galega de Ciencias, celebrado coa familia, amizades e veciñanza da súa infancia na Casona da Torre. Foron instantes de fonda emoción, de risas e de celebración da vida.

Un tráxico accidente puxo fin a esa traxectoria tan vizosa e necesaria. Mais o legado de Aida permanece. Permanece no coñecemento científico que deixou, no exemplo dunha ciencia exercida con responsabilidade e humanidade e na memoria dun recoñecemento —o de Galega Destacada en 2002— que condensou publicamente o sentido profundo da súa vida.

Desde unha experiencia máis persoal e directa, quen coñeceu a Aida no ano 2002 lembra sobre todo a súa alegría vital, ese sorriso amable e sincero que facía máis doada a vida a quen estaba ao seu carón. Aida transmitía pracer por vivir, unha enerxía limpa e honesta que se expresaba tanto no traballo como na amizade. Era unha persoa fondamente empática, sempre disposta a axudar, sen necesidade de demostrar nada, porque a súa transparencia falaba por ela. A súa ausencia sentiuse como a perda dunha luz fermosa, mais a súa presenza segue acompañando o pensamento e a memoria de quen tivo a fortuna de compartila. Viviu intensamente, con ilusión polo que facía e cun fondo cariño polos seus afectos.

Veñen á memoria as palabras de Rafael Barrett: «La ciencia en sí no es buena ni mala: es un medio soberano de hacer el bien si el bien está en nosotros». En Aida estaba. E por iso seguimos debéndolle gratitude, amizade e esperanza.

Aida Fernández Ríos: aprender a ciencia desde o banco de laboratorio (1972-1987)

Antonio Figueras
Profesor de investigación
CSIC - Instituto de Investigacións Mariñas

Un inicio persoal: do teatro ao laboratorio

Coñezo a Aida desde que era moi pequeno. O meu primeiro recordo dela está vinculado á Alianza Francesa de Vigo, un espazo que hoxe resulta difícil de explicar a quen non o viviu. O meu pai, Antonio Figueras Montfort, era un apaixonado do teatro e dirixía o grupo da Asociación da Prensa. Fundou en 1959 o Teatro de Cámara e Ensaio de Vigo, que sobreviviu durante un cuarto de século e polo que pasaron figuras que logo terían moita relevancia na vida cultural e política galega: unha actriz moza chamada María Xosé Queizán ou un novísimo Carlos Príncipe, que co tempo chegaría a ser alcalde de Vigo. Na Alianza Francesa respirábase ese mesmo ambiente de inquietude. Era máis que unha academia de idiomas: era un lugar de encontro onde coincidían estudantes, futuros periodistas, científicos noveis e xente con ganas de algo máis.

VIGO 11

CLAUSURA DE LA EXPOSICION DE LA ALIANZA FRANCESA

En los locales de la Alianza Francesa se celebró ayer por la noche el acto de clausura de la cuarta Exposición de pintores alumnos y ex alumnos de dicho Centro, procediéndose a la entrega de premios establecidos al efecto. Con tal motivo, fueron proyectados documentales cinematográficos sobre la obra de Picasso y otro acerca de París, realizado por el pintor Ignacio Arrondo, que comentó su autor.—(Foto Llanos.)

Foto recollida no *Faro de Vigo* o 5-12-1971 na que aparece Aida Fernández (segunda pola esquerda)

Aida procedía dunha familia traballadora do barrio de Peniche. Comezou os estudos de Peritaxe Mercantil, pero a enfermidade do seu pai obrigouna a interrompelos e a buscar a vida,

primeiro nunha imprenta. Esa interrupción non foi unha derrota: foi un aprazamento. Na Alianza Francesa recibía clases de francés e foi alí onde coñeceu a Carmen Mouriño (Carmiña), que traballaba como técnica no que entón se chamaba Instituto de Investigaciones Pesqueras. Carmiña non era investigadora principal nin catedrática. Era técnica, como o sería Aida uns anos despois. E ela foi quen a animou a presentarse ás oposicións do Consello Superior de Investigacións Científicas (CSIC). Este consello, que podería parecer unha conversación sen maior importancia, cambiou o rumbo da súa vida.

En 1972, con 25 anos, Aida aprobou as oposicións de auxiliar de investigación e ingresou no Instituto. Anos máis tarde, o azar e unha bolsa da Deputación de Pontevedra fixeron que eu tamén empezase a traballar alí, na sede de Bouzas. Volvemos coincidir, xa nun contexto moi distinto ao da infancia. Compartiamos recordos das sedes anteriores: o Colexio Alemán e O Berbés. Falabamos do enorme corvo mariño disecado que vixiaba cos seus ollos de cristal negro o distribuidor do Instituto, pousado sobre un vello aparato branco de laboratorio, e do pastor alemán Burón, gardián temible de Bouzas e cuns problemas de carácter que impoñían respecto a calquera. E recordabamos a Carmiña, cuxo falecemento repentino nos deixou aos dous sen palabras. Os dous perderamos seres queridos de forma inesperada cando eramos pequenos. Creo que iso facía que nos entendésemos sen necesidade de dicilo.

O contexto: ser muller e facer ciencia nos anos 70

Convén recordar como era España cando Aida entrou no CSIC en 1972. As mulleres representaban unha minoría moi reducida na ciencia institucional. O acceso á educación universitaria para as mulleres mellorou respecto a décadas anteriores, pero as barreiras culturais, económicas e legais seguían sendo enormes. A Lei de dereitos políticos, profesionais e do traballo da muller de 1961 eliminou algunhas restricións formais, pero a realidade cotiá era outra. No CSIC daqueles anos, as mulleres eran maioría nas categorías técnicas e administrativas, e minoría case absoluta nos postos de investigación. O camiño de auxiliar a investigadora titular era practicamente inexistente para unha muller sen titulación universitaria previa.

Medio século despois, os datos do *Informe Mujeres Investigadoras 2025* do CSIC seguen mostrando que o problema non está resolto. A famosa «gráfica tesoira», a paridade no doutoramento e a caída progresiva nas categorías superiores reflicten que o teito de cristal persiste: só o 26 % das profesoras de investigación son mulleres e o índice do teito de cristal sitúase nun 1,44. Dito de forma clara: as mulleres teñen que esforzarse case un 50 % máis que os seus colegas masculinos para acadar a mesma posición.

Aida non empezou co vento a favor. Comezou co vento en contra, sen titulación universitaria, nunha época en que iso, para unha muller, pechaba case todas as portas. O feito de que chegase a profesora de investigación, a categoría máis alta do CSIC, e a directora do Instituto non foi unha carreira lineal nin cómoda. Foi unha conquista.

O CSIC dos anos 70: que significaba ser auxiliar de investigación

O CSIC de comezos dos anos 70 era unha institución que dependía criticamente do traballo técnico manual. Non había sensores continuos, nin sistemas automáticos de análises, nin plataformas dixitais de datos. A calidade científica dun traballo dependía, de maneira directa e sen intermediarios, da pericia de quen realizaba as medicións.

Ser auxiliar de investigación non era unha categoría menor. Era unha posición estrutural: preparar reactivos, manter o instrumental, realizar determinacións físico-químicas, rexistrar datos con rigor, colaborar en campañas oceanográficas e garantir a continuidade de series temporais que podían estenderse anos. O auxiliar non estaba na marxe da ciencia. Estaba no seu centro.

Aida comezou nesa posición e foi progresando na escala técnica mentres, paralelamente, retomaba os seus estudos. Licenciada en Bioloxía, carreira concluída en 1986, catorce anos despois de entrar no CSIC, e cunha tese de doutoramento a continuación, dirixida polo profesor Fernando Fraga, defendida en 1992. Non foi un itinerario académico convencional. Foi o de alguén que constrúe a súa formación mentres traballa a xornada completa, sen deixar de medrar en ningunha fronte.

O laboratorio como escola: salinidade, Winkler e cultura do dato

A miña tese de doutoramento desenvolveuse entre 1980 e 1984. Estudaba os camaróns do xénero *Palaemon* na ría de Vigo: cinco especies distribuídas ao longo do gradiente estuarino desde a zona interna, preto do estreito de Rande e a enseada de San Simón, ata as proximidades das illas Cíes. Era un traballo ecolóxico, distribución espacial, dinámica reprodutiva, ciclo larval, pero ningunha interpretación ecolóxica nun estuario se sostén sen unha base físico-química sólida. A salinidade estruturaba a distribución das especies. O osíxeno disolto condicionaba a súa fisioloxía e a súa supervivencia.

Aida Fernández realizando medidas de salinidade
cun salinómetro de indución GILSON en 1988

Por indicación do profesor Fraga, foi Aida quen realizou para o meu traballo as análises de salinidade por condutimetría e quen me ensinou o método de Winkler para a determinación de osíxeno disolto. Cedeume as botellas ámbar con tapón esmerilado, que eran imprescindibles para trasladar as mostras ao laboratorio sen intercambio gasoso coa atmosfera. Axudoume a montar o sistema de titulación e ensinoume a repetir as medidas ata obter valores reproducibles.

Hoxe, con sensores dixitais e sondas multiparamétricas en case todos os barcos, pode parecer que esas técnicas eran sinxelas. Non o eran. A determinación de salinidade por condutimetría esixe un control térmico rigoroso: pequenas variacións de temperatura alteran o resultado. O equipo debe calibrarse con solucións patrón e a lectura debe compararse con estándares internacionais. Nun estuario con gradientes tan marcados como a ría de Vigo, unha décima de unidade de salinidade importa.

O método de Winkler é máis esixente aínda. O osíxeno da mostra fíxase *in situ* mediante sulfato de manganeso e unha solución alcalina de ioduro. Tras a acidificación, libérase iodo nunha cantidade proporcional ao osíxeno orixinal, e ese iodo titúlase con tiosulfato sódico ata un punto final preciso, detectado con amidón como indicador. A estequiometría é directa e elegante, pero o método non perdoa descoidos: a botella ten que encherse sen burbullas, o tapón esmerilado ten que pecharse correctamente, a fixación debe facerse de inmediato e o tiosulfato debe estandarizarse con exactitude. E se a viraxe non é nítida, hai que repetir.

Isto foi o que aprendín con Aida: que un dato dubidoso non se discute, repítese. Que a ciencia empeza por medir ben. Que a interpretación é lexítima só se a medida é sólida. Ela non dramatizaba o erro nin facía pedagoxía explícita disto. Simplemente non aceptaba a imprecisión. Esa actitude, calada e constante, era a súa escola.

Campañas e traballo embarcado

A carreira técnica de Aida non se limitou ao laboratorio. En 1974, con apenas dous anos de Instituto, embarcou na súa primeira campaña oceanográfica: a GALICIA I, a bordo do B/O Cornide de Saavedra. Era unha das dúas únicas mulleres de entre 21 científicos a bordo. Esta cifra non ne-

cesita comentario: define con precisión o que era a oceanografía española dos anos 70 para unha muller. Ela ía como responsable das determinacións de salinidade.

O que non podía saber por aquel entón é que, décadas máis tarde, rescataría as primeiras medidas de pH que o Dr. Fraga fixera nesa mesma campaña, e que as empregaría como punto de ancoraxe histórica para os seus estudos sobre a acidificación do Atlántico. O dato vello, ben tomado, converteuse en ciencia nova. Isto só é posible cando alguén, no seu momento, tivo a disciplina de facelo ben.

Despois virían a GALICIA II, a GALICIA IV, sucesivas campañas ao longo dos anos 80, sempre coa salinidade e a materia orgánica particulada como responsabilidades explícitas. Durante a súa carreira, participou nun total de 30 campañas oceanográficas e acumulou máis de 800 días no mar: atravesou o Atlántico de norte a sur e de leste a oeste, chegou ao Índico e estivo na Antártida. Foi xefa científica en cinco delas.

Embarcarse nos anos 70 sendo muller e técnica non era un trámite. Era un traballo duro en condicións, ás veces, difíciles, con xornadas sen horario, mostras que procesar sen demora e un control de calidade que non se interrompía porque o barco se movese. A experiencia embarcada temperá foi parte da súa formación e ampliou a súa perspectiva: do estuario ao océano aberto, da escala local á rexional, da ría ao Atlántico.

O tránsito cara á investigación propia

Entre 1972 e 1987 prodúcese en Aida unha transformación que non foi abrupta senón acumulativa. As primeiras publicacións científicas coa súa sinatura aparecen na segunda metade dos anos 80: composición química elemental do plancto mariño, estimación de coeficientes para o cálculo de indicadores bioxeoquímicos e intercambio de nutrientes entre as rías e a plataforma costeira. Son traballos técnicos e rigorosos, en liña directa coa cultura do dato que practicara durante máis dunha década.

Cando inicia a súa tese en 1987 faino con quince anos de experiencia práctica no laboratorio e no mar. Non comeza desde cero. Parte dunha base que moi poucos doutorandos teñen: sabe medir,

sabe interpretar o erro, sabe que os datos teñen historia e que esa historia importa. O seu director, Fernando Fraga, era un dos oceanógrafos máis rigorosos da súa xeración. A elección non foi casual.

Non houbo ruptura entre a técnica e a investigadora. Houbo continuidade. E esa continuidade é a clave de toda a súa traxectoria posterior.

Embarcación do Instituto de Investigacións Mariñas, Lampadena, na que Aida Fernández realizou múltiples sesións de mostraxe na ría de Vigo como técnica de laboratorio e posteriormente as correspondentes á súa tese de doutoramento

Science e o Atlántico como escenario

Hai un momento na carreira de Aida que convén destacar con claridade, non polo seu peso simbólico senón polo seu peso científico real. En 2004 foi coautora dun artigo publicado na revista *Science* (Sabine *et al.*: «The oceanic sink for anthropogenic CO_2», *Science* 305: 367-371), que representou a primeira avaliación global dos niveis de CO_2 antropoxénico no océano. Non foi unha participación marxinal: Aida era a responsable dos datos do Atlántico e do sistema do carbónico en varias das campañas transoceánicas que alimentaron esa análise. O artigo cambiou a maneira en que a comunidade científica e os organismos internacionais entendían o papel do océano como sumidoiro de carbono.

Publicar en *Science* non é un fito menor xa que é a revista científica máis citada do mundo. Pero o que fai especialmente relevante esa publicación no contexto deste capítulo é que as medidas que sustentaban os datos de Aida procedían en parte de series temporais iniciadas en campañas como a GALICIA I, de 1974, na que ela mesma estivera tomando datos como técnica. Hai unha liña recta que vai desde as botellas ámbar dos anos 80 ata as páxinas de *Science* en 2004. Esta liña chámase rigor, constancia e continuidade.

Igualmente significativo é que a campaña que dirixiu en 1988 a bordo do barco polaco Profesor Siedlecki, sendo aínda doutoranda, deu lugar a unha publicación sobre a variabilidade das masas de auga no Atlántico Norte que é, aínda hoxe, un dos artigos máis citados de toda a produción científica do IIM-CSIC. Tiña 41 anos, non defendera aínda a súa tese, e xa dirixía campañas internacionais e producía ciencia de primeiro nivel. O traballo «rutineiro» pero esencial de laboratorio quedaba lonxe no tempo, pero non no espírito.

Reflexión final

Aida era a alegría de vivir. Nas últimas celebracións de xubilacións no Instituto conseguiu que eu, un consumado plantígrado, bailase con ela flamenco e merengue sen estragarlle os pés. Desprendía enerxía e contaxiáballa a todo aquel que estaba preto. Tiñamos carácter os dous e, ás veces, discutiamos, pero en canto diciamos un ao outro o que tiñamos que dicir volviamos rir. Lembro as nosas

Cun xersei azul, Aida Fernández Ríos, naquela altura axudante de investigación, rodeada por parte do persoal do Instituto. A maioría é persoal técnico que sostiña o traballo cotián do laboratorio. Unha imaxe do Instituto antes de chamarse Mariñas, cando aínda era Pesqueras, e cando Aida levaba xa unha década construíndo, en silencio, a carreira que a levaría a ser profesora de investigación e directora do Instituto

gargalladas cando alguén a criticou porque, tras unha mostraxe no mar, se puxo ao sol enfundada nun traxe de baño completo con grandes lunares. «Esta muller non ten sentido ningún», dixéronme, aínda que eu pensaba exactamente o contrario. E divertíame a súa chaqueta amarela, estilo Mao, comprada nunha *boutique* de París: dicíame que a puña nas reunións importantes para provocarme.

Os seus traballos sobre o CO_2 antropoxénico no Atlántico axudan a entender o risco que corren organismos con cunchas calcarias, o mexillón, do que Galicia é un dos maiores produtores do mundo, ante o descenso do pH mariño. Foi a primeira muller directora do IIM-CSIC. Acadou a categoría de profesora de investigación, a máis alta do sistema. Foi nomeada académica da Real Academia Galega de Ciencias. Quen traballou con ela recoñecía sempre o mesmo: unha científica aguda e rigorosa, e unha persoa aberta que gozaba compartindo o seu saber, a súa alegría e a súa vitalidade desbordante.

Pero esa cima non se explica sen o traballo de auxiliar de investigación de 1972. Sen as botellas ámbar. Sen o Winkler repetido ata a viraxe exacta. Sen as campañas temperás a bordo do Cornide sendo unha das dúas únicas mulleres de entre 21 científicos. Sen os quince anos de traballo técnico sostido cunha esixencia que non dependía do rango, senón do carácter.

Como escribiu Santiago Ramón y Cajal, un dos poucos Premios Nobel científicos españoles: «O azar afortunado adoita ser case sempre o premio do esforzo perseverante». No caso de Aida, o esforzo sempre precedeu ao recoñecemento. Cando comezou no Instituto non tiña estudos universitarios e o vento sopraba na súa contra: pola súa orixe, polo seu xénero, pola época. Cando a súa vida rematou, en 2015, nun accidente absurdo que nos pillou a todos desprevidos, conseguírao todo.

A súa carreira técnica non foi un prólogo. Foi o fundamento. E esta é, quizais, a lección máis duradeira da súa historia: a excelencia científica pode construírse desde abaixo, con método, disciplina e unha cultura do dato que non admite atallos.

Aida, marchaches sen avisar. Collíchesnos desprevidos. Pero a túa lección permanece.

Hidrografía e bioxeoquímica das rías galegas

Enrique Nogueira García
Investigador científico
IEO, Centro Oceanográfico de Vigo

Preliminar de carácter persoal

Cando o profesor Fiz Fernández Pérez me propuxo participar nesta publicación, en homenaxe á profesora Aida Fernández Ríos por mor do seu nomeamento como Científica do Ano da Real Academia Galega de Ciencias, sentinme moi honrado, pero á par atafegado. A escritura retrotraeume aos comezos da miña carreira investigadora, unha invitación á nostalxia que apelaría á miña relación persoal con Aida e outros compañeiros que formaban parte, naquela altura (1993-1998), do grupo de Oceanografía do Instituto de Investigacións Mariñas (IIM-CSIC).

Estes anos de formación foron esenciais para a miña carreira posterior, na actualidade vinculada ao Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC), e a lembranza que teño deles é moi gratificante. Tiven a boa fortuna de contar cos mentores Fiz e Aida, directores da miña tese de doutoramento, así como co maxisterio de Fernando Fraga e Francisco Gómez Figueiras, nun ámbito de traballo intelectualmente moi estimulante, compartindo experiencias e inquietudes con outros doutorandos, en diferentes etapas da súa formación, que acabarían sendo investigadores do IIM, a Universidade de Vigo, o IEO (Centros Oceanográficos de Vigo e A Coruña —COV e COAC—), o INTECMAR (Instituto Tecnolóxico para o Control do Medio Mariño de Galicia) ou o PML (Plymouth Marine Laboratory): Pepe (X. A. Álvarez Salgado), Carmen (C. G. Castro), Gabi (G. Rosón), Yolanda (Y. Pazos), Mariló (M. D. Doval), Gavin (G. Tilstone), Miguel (M. Gil), Belén (B. Arbones), Marta (M. Álvarez) e Suso (J. Gago). Neste contorno humano, no que tamén se encontraban os contratados posdoutorais Emilio (E. Suárez) e Ramiro (R. Varela), así como os técnicos Trini (Trinidad Rellán) e Ramón (R. Penín), Aida destacaba polo seu temperamento alegre, trato sinxelo e boa disposición para axudarnos en cuestións técnicas, científicas ou administrativas… e, a miúdo, facíanos rir con anécdotas varias e esmendrellantes imitacións da paisaxe da «casa», das que non se libraba nin o mesmísimo profesor Fraga.

A hidrografía e a bioxeoquímica, disciplinas esenciais da oceanografía, aplicadas ao estudo das rías

Aida dedicou parte da súa brillante carreira investigadora a estudar a hidrografía e a bioxeoquímica das rías galegas. A hidrografía ocúpase da medición e descrición das características físicas do océano, como a temperatura, a salinidade ou as correntes, mentres que a bioxeoquímica aborda o estudo das interaccións entre procesos biolóxicos, xeolóxicos e químicos que implican aos elementos que sustentan a produción biolóxica, como o carbono, nitróxeno e fósforo nas súas diferentes formulacións inorgánicas e orgánicas. Un aspecto crítico de ambas as disciplinas é o relativo aos procedementos de estimación e medida das variables que definen as condicións físicas e bioxeoquímicas. Os métodos e protocolos de análise evolucionaron ostensiblemente nos últimos 50 anos, se ben, en xeral, consonte os mesmos principios analíticos. Estas variables considéranse actualmente variables esenciais do océano e son determinantes para coñecer e predicir o estado de saúde dos ecosistemas mariños. Aida exerceu funcións de auxiliar de investigación ao comezo da súa carreira, e penso que este feito é clave para comprender o rigor que aplicaba nas súas investigacións.

O funcionamento dos ecosistemas mariños depende fundamentalmente da hidrografía e bioxeoquímica do medio peláxico, o hábitat da maior parte dos organismos mariños, en particular do plancto, un conxunto moi diverso de organismos na súa maioría microscópicos que representa arredor do 90 % da biomasa mariña total. En liñas xerais, a biocenose planctónica está integrada por catro grandes compoñentes: fitoplancto, organismos fotosintéticos unicelulares procariotas (cianobacterias) e eucariotas (p. ex. diatomeas e dinoflaxelados), responsables da produción primaria, base da rede trófica mariña, e da xeración de entre o 50 % e o 85 % do osíxeno atmosférico; zooplancto, organismos heterótrofos, na súa maioría pluricelulares (metazoos), pero tamén unicelulares (protozoos), principais consumidores do fitoplancto e outros organismos planctónicos; microorganismos heterótrofos (bacterias e arqueas), que supoñen a maior fracción da biomasa mariña e son responsables da descomposición e remineralización da materia orgánica; virioplancto, virus acuáticos, na súa maior parte bacteriófagos, que interactúan coas bacterias e o fitoplancto regulando a súa proliferación. A estes compoñentes vivos hai que engadir os detritos, conxunto formado por restos

de organismos e materia fecal, así como materiais antropoxénicos diversos, maiormente microplásticos na actualidade. O plancto desempeña un papel clave na transferencia de materia e enerxía a través da rede trófica e os ciclos bioxeoquímicos. Regula o clima (bomba biolóxica) mediante a captación de carbono pola absorción de CO_2 asociado á fotosíntese do fitoplancto e o seu secuestro no leito mariño debido á sedimentación de materia orgánica particulada planctónica, mediada de forma significativa polo zooplancto e o fitoplancto.

As rías galegas son ecosistemas singulares, de elevada produtividade e biodiversidade, que prestan múltiples servizos ecosistémicos. A súa dinámica vén determinada polos seus peculiares trazos: fisiográficos, como vales fluviais afundidos con sección en «V» e profundidade crecente desde a cabeceira á boca, o que lles confire unha boa conexión coa plataforma continental adxacente; hidrográficos, con achegas continentais moderadas na cabeceira, o que lles outorga o seu carácter de baías parcialmente mesturadas e o seu característico sistema de circulación residual positiva bicapa, con saída de auga cara á plataforma por superficie e entrada de auga subsuperficial de plataforma polo fondo; oceanográficos, pola influencia do afloramento costeiro, que actúa como axente fertilizador e modulador da circulación. Polas súas características e accesibilidade considéranse ecosistemas privilexiados para a investigación científica oceanográfica.

Protocolos e técnicas analíticas: fundamentos da investigación hidrográfica e bioxeoquímica

Durante preto de dúas décadas desenvolveu a súa actividade no IIM como auxiliar e axudante de investigación, e titulada técnica especializada, compaxinando ese labor coa obtención da licenciatura en Bioloxía (1986) e do doutoramento (1992). Durante esta fase da súa carreira, desempeñou preminentemente tarefas de carácter técnico no laboratorio e tamén formou parte do equipo de investigación en diversas campañas oceanográficas. Isto non lle impediu participar na elaboración de publicacións científicas relevantes que abordaban a hidrografía e bioxeoquímica das rías, como autora principal ou coautora, e participar en proxectos de investigación liderados polo seu mentor, Fernando Fraga, ou os seus compañeiros Fiz Fernández Pérez e Francisco Gómez

Figueiras. Os desempeños profesionais e persoais de Aida nesta fase da súa carreira reflicten trazos destacables da súa personalidade: o afán de superación e a tenacidade necesaria para alcanzar os obxectivos que pretendía, motivados pola súa curiosidade. Estes atributos son, en xeral, comúns entre as persoas que deciden dedicarse á investigación, pero no caso de Aida complementábanse coa súa gran capacidade de traballo e dedicación para poder compaxinar a elevada demanda asociada ás tarefas técnicas, máis laboriosas que na actualidade, coa adquisición dos coñecementos e a obtención das titulacións necesarias para progresar na súa carreira profesional. Xogou a favor de Aida o contorno profesional e humano no que realizou o seu traballo, que lle permitiu desenvolver as súas calidades e capacidades. Os que compartiron con ela este período da súa carreira sinalan, ademais de aos seus compañeiros antes mencionados, á investigadora Carmen Mouriño como unha figura esencial, inspiradora do devir da súa carreira.

A capacitación técnica de Aida queda patente ao revisar as tarefas que se levaban a cabo nas campañas oceanográficas GALICIA. Realizadas case anualmente nos B/O García del Cid e Explorador entre 1974 e 1990, estas campañas sentaron as bases do coñecemento da hidrografía e bioxeoquímica da plataforma continental e das rías galegas. As variables obtíñanse a partir da análise de mostras adquiridas en profundidades discretas con botellas oceanográficas tipo Niskin montadas no cable e provistas dos seus correspondentes «mensaxeiros» para accionar, secuencialmente, o seu peche. As variables físicas medidas eran: temperatura e profundidade, mediante a lectura dos termómetros de inversión acoplados ás botellas oceanográficas; a salinidade, analizando mostras de auga con salinómetro de indución calibrado con auga de mar ‘normal’; e a densidade, calculada baseándose na ecuación de estado a partir das medidas de temperatura, salinidade e presión. Obtíñanse tamén perfís continuos de temperatura utilizando o batitermógrafo, baseado nos cambios das propiedades mecánicas de certos materiais ante a presión e profundidade. En canto ás variables bioxeoquímicas, estas obtíñanse aplicando diferentes procedementos de análises: pH e alcalinidade, mediante método potenciométrico (eléctrodo de vidro combinado cun eléctrodo de referencia de Ag/AgCl); osíxeno polo método de Winkler, consistente na titulación do iodo con tiosulfato de sodio, que segue sendo na actualidade o método de referencia para a calibración dos sensores electrónicos de medición de osíxeno disolto (oxímetros) acoplados ás sondas multiparamétricas; nutrientes inorgánicos (nitrato,

nitrito, fosfato e silicato), por colorimetría e análise de fluxo segmentado, vixente na actualidade pero con melloras na automatización e límites de detección; carbono e nitróxeno orgánico particulado, por combustión a alta temperatura mediante un analizador elemental (CHN), técnica de referencia no programa JGOFS (Joint Global Ocean Flux Study), que sentaría as bases da bioxeoquímica moderna; clorofila, mediante fluorimetría. Aida dominaba todas estas técnicas analíticas, así como as ferramentas de cálculo da época: a calculadora científica de Texas Instruments TI-30 e o ordenador persoal IBM PS/2 que programaba en Fortran.

Hidrografía e balances de nutrientes: modelos de caixas

Na década dos 90, Aida participou nunha serie de traballos do grupo de Oceanografía orientados a mellorar o coñecemento da dinámica hidrográfica e os balances de nutrientes das rías. Estas contribucións fundamentáronse na aplicación dun modelo de caixas bicapa, baseado no principio de conservación de masa e sal en condicións estacionarias, para cuantificar os caudais de auga que se intercambian entre a ría e a plataforma continental e a mestura entre ambas as capas: a superficial, menos salina e que flúe cara á plataforma, e a de fondo, máis salina e que se interna na ría desde a plataforma. Este tipo de modelo, utilizado con anterioridade para a ría de Arousa (Otto, 1975; González *et al*., 1979), aplicouse por primeira vez á ría de Vigo (Prego, Fraga e Ríos, 1990) para cuantificar a variabilidade estacional dos intercambios e os tempos de residencia. O traballo evidenciou a importancia das achegas continentais na cabeceira da ría, como motor da circulación residual, así como o papel modulador dos procesos de afloramento e afundimento asociado, respectivamente, aos ventos de compoñente norte e sur: o afloramento, reforzando a circulación residual positiva e favorecendo o intercambio con plataforma a través das bocanas; o afundimento, bloqueando estes intercambios e xerando un patrón de circulación residual restrinxido ao interior da ría (Fraga e Prego, 1989). Entre as súas contribucións inclúense tamén melloras metodolóxicas para cuantificar as achegas de auga doce á ría, validando a aplicación da Lei de Horton para estimar as descargas fluviais (Rosón *et al.*, 1991), así como un procedemento para calcular as achegas continentais por escorrentía na cunca hidrográfica a partir da precipitación, moi útil cando non se dispón

de canles fluviais aforadas (Ríos *et al.*, 1992). Os caudais de descarga fluvial ou de escorrentía combinados coa caracterización da composición química da achegas fluviais, como por exemplo a concentración de nutrientes inorgánicos, permiten cuantificar a entrada destes compostos nas rías e a súa posible modificación nas zonas internas, propiamente estuarinas (Pérez *et al.*, 1992), necesarias para realizar un correcto balance de nutrientes no ecosistema. Na súa tese de doutoramento (Ríos, 1992), Aida aplicaría a metodoloxía de modelo de caixas para cuantificar a variabilidade estacional (entre os meses de febreiros de 1988 e 1989) do balance de nutrientes e a intensidade de procesos biolóxicos da comunidade de fitoplancto na ría de Vigo, avaliando os cambios de composición de especies, a produtividade do sistema ou as taxas de sedimentación (Ríos, 1992). O traballo de Ríos *et al.* (1995) derivado da súa tese proporciona un bo exemplo de aplicación do modelo de caixas e a integración de datos físicos, bioxeoquímicos e distribucións de fitoplancto. Nel púxose de manifesto que a produción nova impera durante a estación de afloramento, asociado á inxección de nitrato coa auga aflorada, mentres que a produción rexenerada cobra importancia durante os meses en que predominan os procesos de afundimento, nos que prima a rexeneración da materia orgánica na ría e a conseguinte dispoñibilidade de amonio. Esta variación estacional asóciase, por outra parte, coa sucesión de fitoplancto, e dá lugar á dominancia de diatomeas na estación de afloramento, de marzo a setembro, e de dinoflaxelados na de afundimento (Figueiras e Ríos, 1993).

Os modelos de caixas experimentaron un progreso substancial a mediados dos 90, ao incorporar a temperatura como trazador, tendo en conta o balance térmico, e incluír un termo de variación temporal ás ecuacións de conservación (Rosón, Álvarez-Salgado e Pérez, 1997). As novas formulacións posibilitaron a transición do suposto estacionario dos modelos iniciais (asunción de condicións constantes) ao non-estacionario, capaz de resolver a dinámica de curta escala do acoplamento físico-bioxeoquímico e refinar as estimacións dos balances e fluxos. Utilizando este tipo de modelo, Álvarez-Salgado *et al.* (1996) puxeron de manifesto a relevancia dos eventos de curta-escala de afloramento-relaxación-afundimento, que acontecen a escalas de días e superpóñense ao patrón estacional de afloramento, na evolución dos fluxos e balances netos de nitróxeno inorgánico, orgánico disolto e particulado (Álvarez-Salgado *et al.*, 1996).

Fotografía de Aida na Lampadena, embarcación empregada para realizar as mostraxes na ría de Vigo. Nela pódese ver a Aida manipulando as botellas oceanográficas Niskin provistas de termómetros de inversión durante a mostraxe quincenal para a súa tese de doutoramento (1987). A mostraxe nesta embarcación prolongaríase ata 1996 para xerar a serie temporal de variables hidrográficas e bioxeoquímicas que daría lugar a traballos posteriores

Nas dúas últimas décadas, os modelos hidrodinámicos 3D baseados nas ecuacións primitivas de Navier-Stokes cobraron progresivamente maior importancia para resolver a hidrodinámica das rías (ex. Taboada *et al.*, 1998; Cruz *et al.*, 2021), acoplados nalgúns casos con modelos bioxeoquímicos (ex. Castro-Olivares *et al.*, 2024). Os modelos de caixas, implementados e mellorados polo grupo de Oceanografía na década dos 90, seguen sendo utilizados, non obstante, na

actualidade: a súa simplicidade computacional, fácil execución e baixo requirimento de datos, en comparación cos modelos numéricos de simulación, fan deles unha ferramenta idónea cando non se dispón das ecuacións que describan, por exemplo, determinados procesos biolóxicos (Míguez *et al.*, 2001) ou hidrográficos (Ibanhez *et al.*, 2021). Proporcionan ademais un procedemento robusto para validar os modelos numéricos de simulación.

Composición elemental do plancto e trazadores bioxeoquímicos

O estudo dos ciclos bioxeoquímicos dos elementos no medio mariño, a cuantificación das reservas, fluxos e balances que se poden derivar da aplicación dun modelo de caixas, require «conocer las relaciones de los elementos que forman la materia orgánica, carbono, hidrógeno, nitrógeno, fósforo e oxígeno, en plancton natural» (Ríos e Fraga, 1987: 619). As relacións estequiométricas entre os elementos constituíntes do plancto, coñecidas como relacións de Redfield (Redfield, 1934 e 1958), definen a proporción numérica (en moles) dos elementos principais que forman a materia orgánica mariña. Esta relación é indispensable para construír os trazadores de masas de auga «NO» e «PO» propostos por Broecker (Broecker, 1974; Broecker e Peng, 1982). Estes parámetros son (case-)conservativos xa que permiten diferenciar entre os cambios na concentración de osíxeno e nutrientes (nitróxeno e fósforo) no medio debidos aos procesos biolóxicos de respiración e fotosíntese dos producidos por procesos de mestura entre masas de auga. Broecker utilizou a relación canónica de Redfield [$O_{138}C_{106}N_{16}P$] para formular os trazadores.

A finais dos 80, o profesor Fraga e os membros do grupo de investigación refinaron os parámetros de Broecker, axustando as relacións de Redfield á composición bioquímica do fitoplancto e a materia orgánica das rías, e propuxeron novos trazadores que incorporaban o efecto de procesos biolóxicos que non foran tidos en consideración. As achegas do grupo de Oceanografía nesta liña de investigación son internacionalmente recoñecidas, consideradas un fito da bioxeoquímica mariña española, e a contribución de Aida nelas foi moi relevante. Aínda que estas achegas son revisadas por X. A. Álvarez Salgado noutro capítulo, considero conveniente mencionalas aquí xa que os desenvolvementos propostos derivaron de investigacións realizadas nas rías, que certi-

ficaron a idoneidade destes ecosistemas singulares como laboratorios de investigación mariña nos que os resultados obtidos son escalables a nivel global. Así, de forma sucinta e centrada nas achegas de Aida, destacan: a reformulación das relacións estequiométricas, avaliando a composición elemental do plancto total, fitoplancto, zooplancto e detritos, esta última asimilable á das bacterias que colonizan o material detrítico, a partir de mostras naturais obtidas na ría de Vigo (Ríos e Fraga, 1987; Ríos *et al.*, 1998); a corrección dos parámetros de Broecker para ter en conta o exceso de nitrito e amonio en zonas costeiras, compostos que requiren menor nivel de consumo de osíxeno para a súa formación a partir da remineralización da materia orgánica, e que producen unha menor liberación de osíxeno cando son utilizadas polo fitoplancto como substrato durante a fotosíntese (parámetros «NO_{corr}», «PO_{corr}» e «CO_{corr}»), e a proposta dun novo parámetro conservativo («CAO»; Carbono-Alcalinidade-Osíxeno) para computar non só o efecto da remineralización e fotosíntese, senón tamén as variacións de CO_2 debidas á formación ou disolución do carbonato cálcico asociado ao metabolismo de organismos calcarios, como os foraminíferos ou os cocolitofóridos (Ríos, Fraga e Pérez, 1989); o establecemento dos límites das relacións «CO» «NO» tendo en conta a composición elemental de diferentes biomoléculas (proteínas, compostos fosforados, carbohidratos e lípidos) que compoñen o plancto (Fraga *et al.*, 1998); a aplicación dos parámetros conservativos para derivar o consumo de nutrientes e síntese de biomoléculas diferencial na columna de auga, asociado aos patróns nictamerais de migración vertical de *Gymnodinium catenatum* durante un evento de proliferación desta especie formadora de floracións algais nocivas (Fraga *et al.*, 1992).

Series temporais na ría de Vigo

A dinámica e o funcionamento dos ecosistemas mariños están gobernados tanto por constricións (leis naturais) como por continencias impredicibles, de aí a súa consideración como «sistemas históricos». En particular, a ría de Vigo caracterízase polo seu elevado dinamismo e número de interaccións, en moitos casos non-lineais, entre os compoñentes abióticos (océano, atmosfera, achegas continentais) e bióticos que a conforman, as cales se producen nun rango moi extenso de escalas

temporais e espaciais (de microescala a escala global) e niveis de organización (individuos, poboacións, comunidades). Para entender e interpretar estes sistemas é imprescindible dispoñer de series temporais, obtidas de forma regular e sostida, das variables esenciais físicas, bioxeoquímicas e biolóxicas que definen o seu funcionamento e dinámica, xa que é a única forma de predicir con certeza a resposta a escenarios futuros de cambio, baseándose no coñecemento histórico da regularidade das respostas fronte a diferentes continxencias do pasado.

No actual escenario de cambio global (ex. quecemento, sobrexplotación de recursos e contaminación crecente), a importancia dos sistemas de observación do medio mariño é indiscutible. Pero, a principios dos 80 e anos posteriores, a monitorización continuada que require o establecemento dunha serie temporal considerábase «un traballo pouco glamuroso, rara vez recompensado polas axencias de financiamento ou a comunidade científica» (Nisbet, 2007). O grupo de Oceanografía, navegando a contracorrente, poría en marcha un programa pioneiro de observación de variables hidrográficas e bioxeoquímicas na ría de Vigo en 1979 (Pérez *et al.*, 1985), que se mantería, con interrupcións e cambios na estratexia de mostraxes, ata 1995. A monitorización realizada durante este período, con mostras recollidas varias veces por semana, que permitiron analizar como cambian as condicións físicas, químicas e biolóxicas da ría ao longo do tempo (Nogueira *et al.*, 1997a), daría lugar a algunhas das publicacións xa citadas, relativas á hidrografía e á bioxeoquímica da ría de Vigo, así como á tese de Aida (Ríos, 1992) e os traballos que dela derivaron.

A estas investigacións hai que engadir as realizadas por Nogueira, Pérez e Ríos (1997a, 1997b e 1998), as que, utilizando procedementos estatísticos de análises de series temporais, como análise de Fourier, filtrado temporal secuencial, modelos ARIMA e de función de transferencia, definirían os modos de variación temporal, os patróns estacionais e as tendencias (entre 1987 e 1992, amb. incl.) das variables meteorolóxicas, hidrográficas (temperatura, salinidade) e bioxeoquímicas (nutrientes, fitoplancto), así como as relacións dinámicas entre elas, isto é, tendo en conta o posible retardo e inercia na resposta aos forzadores. Os resultados amosan que a temperatura da auga segue un ciclo anual ben marcado (figura 1), mentres que a salinidade presenta unha variabilidade máis irregular, fortemente influenciada polas achegas continentais, por descarga fluvial e escorrentía, así como polos episodios de afloramento costeiro, que introducen augas máis frías cara ao interior da ría (Nogueira *et al.*, 1997a).

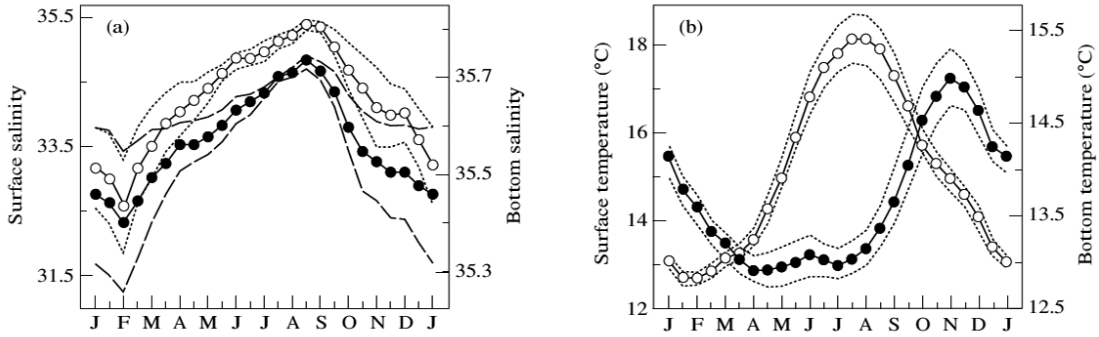


Figura 1. Ciclo estacional suavizado (medias quincenais entre 1987 e 1992) das propiedades termohalinas de superficie e fondo (2 e 40 m, respectivamente) no canal principal da zona media da ría de Vigo («estación fixa», EF).
(a) Salinidade. (b) Temperatura. Puntos brancos: superficie; puntos negros: fondo; liñas descontinuas: desviacións estándar

Os nutrientes, que sustentan a produtividade biolóxica do sistema, presentan ciclos estacionais definidos, pero difiren segundo o tipo de composto e a profundidade (figura 2). Estes cambios responden aos intercambios de auga co océano aberto e aos procesos internos na ría, como a reciclaxe de materia orgánica que ten lugar na columna de auga e os sedimentos. O fitoplancto, estimado mediante a concentración de clorofila, presenta dous máximos anuais característicos, en primavera e outono, asociados a períodos de alta produción primaria (Nogueira *et al.*, 1997a).

Un dos resultados máis relevantes destes estudos é a detección de tendencias a longo prazo durante o período estudado. Obsérvase un aumento progresivo da salinidade e unha diminución da temperatura, tanto na superficie como no fondo, xunto con cambios sutís na composición de nutrientes. Non se evidenciaron signos claros de eutrofización xeneralizada do estuario, pero si un lixeiro aumento dalgúns nutrientes e unha diminución gradual da clorofila, especialmente na superficie. Estes cambios parecen estar relacionados cun fortalecemento da circulación estuarina, asociado á evolución das condicións meteorolóxicas e o réxime de ventos costeiros (Nogueira *et al*., 1997a).

Estudos complementarios profundaron na resposta do estuario a forzamentos externos a curto prazo, e mostraron como a salinidade, a temperatura e os nutrientes reaccionan aos cambios no

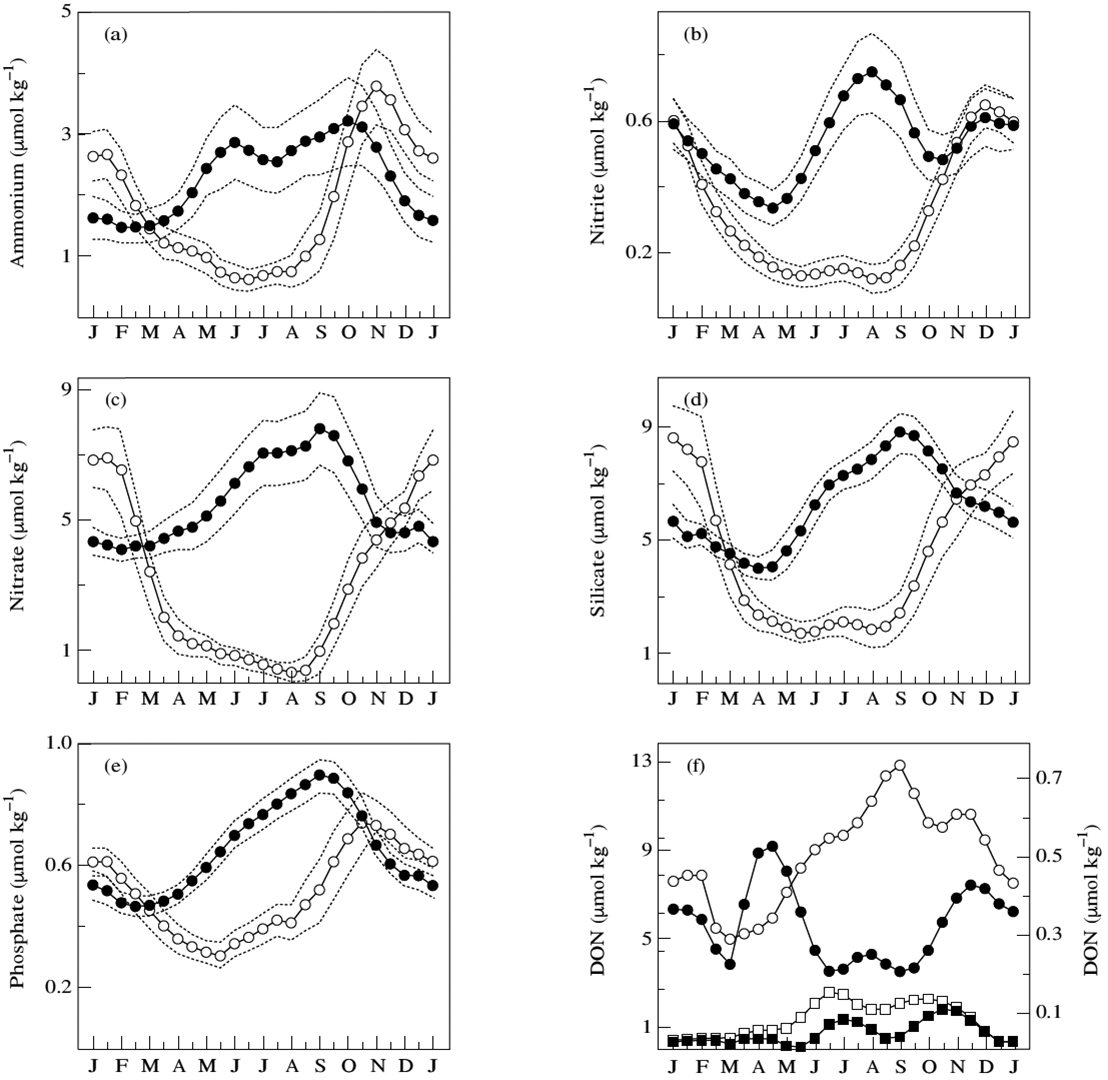


Figura 2. Ciclos estacionais suavizados (medias quincenais entre 1987 e 1992) na «estación fixa» (EF) da ría de Vigo de variables esenciais bioxeoquímicas: (a) amonio, (b) nitrito, (c) nitrato, (d) silicato, (e) fosfato e (f) nitróxeno orgánico disolto (NOD, círculos) e fósforo orgánico disolto (POD, cadrados). Puntos brancos: superficie; puntos negros: fondo; liñas descontinuas: desviacións estándar

vento, as precipitacións e o afloramento con desfasamentos temporais de días ou semanas (Nogueira *et al.*, 1997b; Nogueira *et al.*, 1998). En conxunto, estes traballos demostraron que a ría de Vigo é un sistema altamente sensible ás condicións ambientais externas, pero tamén regulado por complexos procesos internos. Este coñecemento é esencial para comprender a súa evolución ambiental e para apoiar a xestión sostible dun ecosistema clave para Galicia. En 2006, as series temporais obtidas na ría de Vigo polo IIM (entre 1987 e 1995) e polo COV (entre 1994 e 2006) e na ría da Coruña polo COAC (entre 1991 e 2006) combinaríanse para analizar as evidencias bioxeoquímicas do cambio climático nas rías galegas (Castro *et al*., 2009), e ofrecen un bo exemplo da utilidade das series temporais.

Na actualidade, a observación sistemática de variables hidrográficas, bioxeoquímicas e comunidades de plancto nas rías realízana o COV e o COAC, co Radial de Vigo (ex. Otero *et al*., 2023) e Radial da Coruña (ex. Bode *et al.*, 2019) como compoñentes do sistema de observación oceánica do IEO (https://www.ieoos.es/), así como o INTECMAR, no marco do programa de control do medio mariño de Galicia (https://www.intecmar.gal/). Creo que a profesora Aida Fernández Ríos, pioneira da investigación oceanográfica, apoiaría ferventemente o esforzo que fan os técnicos/as e o persoal investigador por manter estes sistemas de observación, seguindo o ronsel das súas contribucións para ampliar o coñecemento das rías, fundamento para a salvagarda dos servizos que estes ecosistemas singulares prestan á sociedade galega.

Referencias bibliográficas

Álvarez-Salgado X.A., Rosón G., Pérez F.F., Figueiras F.G., Ríos A.F. (1996). Nitrogen cycling in an estuarine upwelling system, the Ría de Arousa (NW Spain). II. Spatial differences in the short-time-scale evolution of fluxes and net budgets. Marine Ecology Progress Series, 135, 275-288.

Bode A., Álvarez M., Ruiz-Villareal M., Varela M.M. (2019). Changes in phytoplankton production and upwelling intensity off A Coruña (NW Spain) for the last 28 years. Ocean Dynamics, 69, 861-873.

Broecker W.S. (1974). «NO», a conservative water-mass tracer. Earth and Planetary Science Letters, 23, 100-107.

Broecker W.S., Peng T.-H. (1982). Tracers in the Sea. Lamont-Doherty Geological Observatory, Columbia University, New York, 10964, 690 pp.

Castro C.G., Álvarez-Salgado X.A., Nogueira E., Gago J., Pérez F.F., Bode A., Ríos A.F., Rosón G., Varela M.(2009). Capítulo 15. Evidencias bioxeoquímicas do cambio climático. En: Evidencias e Impactos do Cambio Climático en Galicia. Santiago de Compostela, Xunta de Galicia, Consellería de Medio Ambiente e Desenvolvemento Sostible, 303-326.

Castro-Olivares A., Des M., de Castro M., Pereira H., Picado A., Días J.M., Gómez-Gesteira M. (2024). Coupled hydrodynamic and biogeochemical modeling in the Galician Rías Baixas (NW Iberian Peninsula) using Delft3D: Model validation and performance. Journal of Marine Science and Engineering, 12: 2228.

Cruz E.R., Nolasco R., Padín X.A., Gilcoto M., Babarro J.M.F., Dubert J., Pérez F.F. (2021). A high-resolution modelling study of the circulation patterns at a coastal embayment: Ría de Pontevedra (NW Spain) under upwelling and downwelling conditions. Frontiers in Marine Science, 8, 661250.

Figueiras F.G., Ríos A.F. (1993). Phytoplankton succession, red tides and the hydrographic regime in the Rías Bajas of Galicia. En: T.J. Smayda e Y. Shimizu (eds.). Toxic Phytoplankton Blooms in the Sea. Elsevier Science Publishers B.V., 239-244.

Fraga F., Pérez F.F., Figueiras F.G., Ríos A.F. (1992). Stoichiometric variations of N, P, C and O_2 during a Gymnodinium catenatum red tide and their interpretation. Marine Ecology Progress Series, 87, 123-134.

Fraga F., Prego R. (1989). Condiciones hidrográficas previas a la purga de mar. En: La purga de mar como fenómeno natural. Las mareas rojas. Cuadernos del Área de Ciencias Marinas, 4, 21-44. Ediciós do Castro, A Coruña.

Fraga F., Ríos A.F., Pérez F.F., Figueiras F.G. (1998). Theoretical limits of oxygen:carbon and oxygen:-nitrogen ratios during photosynthesis and mineralisation of organic matter in the sea. Scientia Marina, 62 (1-2), 161-168.

González N., González J.J., García C., Cabana J.M. (1979). Dinámica de nutrientes en las Rías de Arosa y Muros (NW España). Boletín. Instituto Español de Oceanografía, 5, 51-79.

Ibanhez J.S.P., Álvarez-Salgado X.A., Nieto-Cid M., Rocha C. (2021). Fresh and saline submarine groundwater discharge in a large coastal inlet affected by seasonal upwelling. Limnology and Oceanography, 66 (6), 2141-2158.

Míguez B.M., Fariña-Busto L., Figueiras F.G., Pérez F.F. (2001). Sucession of phytoplankton assemblages in relation to estuarine hydrodynamics in the Ría de Vigo: A box model approach. Scientia Marina, 65 (Suppl. 2), 65-76.

Nisbet E. (2007). Cinderella science. Nature, 450 (6), 789-790.

Nogueira E., Pérez F.F., Ríos A.F. (1997a). Modelling thermohaline properties in an estuarine upwelling ecosystem (Ría de Vigo: NW Spain) using Box-Jenkins transfer function models. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 44 (6), 685-702.

Nogueira E., Pérez F.F., Ríos A.F. (1997b). Seasonal patterns and long-term trends in an estuarine upwelling ecosystem (Ría de Vigo: NW Spain). Estuarine, Coastal and Shelf Science, 44 (3), 285-300.

Nogueira E., Pérez F.F., Ríos A.F. (1998). Modelling nutrients and chlorophylla time series in an estuarine upwelling ecosystem (Ría de Vigo: NW Spain) using the Box-Jenkins approach. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 46 (2), 267-286.

Otero P., Cabrero A., Alonso-Pérez F., Gago J., Nogueira E. (2023). Temperature and salinity trends in the northern limit the Canary Current Upwelling System. Science of the Total Environment, 901, 1657791.

Otto L. (1975). Oceanography of the Ría de Arosa (NW Spain). Koninklijk Nederlands Meteorologish Instituut, Medelingen en Verhandelingen, 96, 210 pp.

Pérez F.F., Ríos A.F., Fraga F., Mouriño C. (1985). Datos hidrográficos de la Ría de Vigo (1979-1984). Datos informativos 14, 1-127. CSIC - Instituto de Investigaciones Pesqueras (Vigo).

Prego R., Fraga F. (1992). A simple model to calculate the residual flows in a Spanish ría. Hydrographic consequences in the ría de Vigo. Estuarine, Coastal and Shelf Sciences, 34, 603-615.

Prego R., Fraga F., Ríos A.F. (1990). Water interchange between the Ría of Vigo and the coastal shelf. Scientia Marina, 54 (1), 95-100.

Redfield A.C. (1958). The biological control of chemical factors in the environment. American Scientist, 46, 205-221.

Redfield A.C. (1934). On the Proportions of Organic Derivatives in Sea Water and Their Relation to the Composition of Plankton. James Johnstone Memorial Volume, University Press of Liverpool, 176-192.

Ríos A.F. (1992). El fitoplancton en la Ría de Vigo y sus condiciones ambientales. Tese de doutoramento, Universidade de Santiago de Compostela, 416 pp.

Ríos A.F., Fraga F. (1987). Composición química elemental del plancton marino. Investigación Pesquera, 51 (4), 619-632.

Ríos A.F., Fraga F., Figueiras F.G., Pérez F.F. (1995). New and regenerated production in relation to the proliferations of diatoms and dinoflagellates in natural conditions. En: P. Lassus, G. Arzul, E. Erard, P. Gentien, C. Marcaillou. Harmful marine Algal Blooms. Technique et Documentation – Lavoisier, Intercept Ltd., 663-668.

Ríos A.F., Fraga F., Pérez F.F., Figueiras F.G. (1998). Chemical composition of phytoplankton and particulate organic matter in the Ría de Vigo (NW Spain). Scientia Marina, 62 (3), 257-271.

Rosón G., Álvarez-Salgado X.A., Pérez F.F. (1997). A non-stationary box model to determine residual fluxes in a partially mixed estuary, based on both thermohaline properties: Application to the Ría de Arousa (NW Spain). Estuarine, Coastal and Shelf Science, 44, 249-262.

Taboada J. J., Prego R., Ruiz-Villarreal M., Montero P., Gómez-Gesteira M., Santos A., Pérez-Villar V. (1998). Evaluation of the seasonal variations in the residual patterns in the Ria de Vigo (NW Spain) by means of a 3D baroclinic model. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 47, 661-670.

Máis alá dos legados de A. C. Redfield e W. S. Broecker: revisando a estequiometría dos océanos

Xosé Antón Álvarez Salgado
Profesor de investigación
CSIC - Instituto de Investigacións Mariñas

Un pouco de contexto

Aida Fernández Ríos (Vigo, 1947-Moaña, 2015) incorporouse como auxiliar de investigación no Laboratorio de Vigo do Instituto de Investigaciones Pesqueras, xerme do actual Instituto de Investigacións Mariñas, no ano 1972. O seu ingreso coincidiu cun tempo de mudanza, co traslado desde as provisionais instalacións de Beiramar ao edificio de Bouzas en 1973, que abría novos horizontes. Naquel tempo, os auxiliares non estaban asignados a grupos de investigación concretos e mesmo realizaban labores de apoio á dirección do instituto. Sexa como for, Aida non tardou en vencellarse á oceanografía, motivada pola súa colega Carmen Mouriño (Celanova, 1935-Vigo, 1986), da man do profesor Fernando Fraga (Santiago de Compostela, 1922-Nigrán, 2020): en setembro de 1974 participou na súa primeira campaña oceanográfica, a GALICIA I, a bordo do B/O Cornide de Saavedra, para determinar a salinidade da auga do mar. A esta seguíronlle outras tantas campañas da saga GALICIA, nas que foi afrontando novos retos, como a determinación do pH, un dos eixes da súa carreira científica (véxase o artigo de Maribel I. García-Ibáñez neste mesmo libro), ou da composición elemental da materia orgánica particulada, sobre a que trata este capítulo.

Despois de licenciarse en Bioloxía en 1986, Aida comezou a súa tese de doutoramento baixo a dirección do profesor Fernando Fraga, ás portas da súa «xubilación forzosa». Daquela, unha das teimas do profesor Fraga era darlle unha volta a dous traballos clásicos en oceanografía química: Redfield *et al.* (1963), sobre a influencia dos organismos mariños na composición da auga de mar; e Broecker (1974), sobre a definición de novas variables químicas («NO», «PO» e «CO»), independentes da actividade biolóxica no océano, que puidesen servir como trazadores da circulación e mestura de masas de auga máis alá da salinidade e a temperatura.

Fotografía tomada durante a campaña GALICIA VI, do 1 ao 12 de decembro de 1983, a bordo do B/O García del Cid. De esquerda a dereita, arriba: Irene García Palacios, Aida Fernández Ríos, Fernando Fraga Rodríguez, Carmen Mouriño Sabucedo; abaixo: Fiz Fernández Pérez, Victoriano Valencia Santana e Eliseo (cociñeiro)

Froito dese esforzo xurdiron unha serie de artigos en revistas científicas; entre eles destacaría o de Ríos e Fraga (1987), por ser o primeiro de Aida, publicado en español na revista corporativa do CSIC, *Investigación Pesquera*, sobre a composición elemental do plancto na ría de Vigo. Un par de anos máis tarde, Ríos *et al.* (1989) publicaron en *Scientia Marina*, herdeira de *Investigación Pesquera*, xa en inglés, os cálculos refinados do «NO», «PO» e «CO» orixinalmente ideados por Wallace S.

Broeker. Estes dous artigos foron os piares da súa tese de doutoramento: *El fitoplancton en la Ría de Vigo y sus condiciones ambientales*, que defendeu na Universidade de Santiago de Compostela en xuño de 1992.

Despois seguiron unha serie de traballos en que se poñía en práctica a utilidade destas novas variables químicas refinadas para a detección e cuantificación do impacto de especies de microplancto con capacidade de migración vertical, que forman «mareas vermellas» nas costas de Galicia, como é o caso do dinoflaxelado *Gymnodinium catenatum* (Fraga *et al.*, 1992) e do ciliado fotosintético *Mesodinium rubrum* (Fraga *et al.*, 1999), introducindo ademais unha nova variable química conservativa, «NCO», combinación de «NO» e «CO». Esta liña de investigación culminou con tres traballos que se publicaron en *Scientia Marina* ao longo do ano 1998, sobre os límites teóricos das relacións entre osíxeno, carbono e nitróxeno no mar (Fraga *et al.*, 1998); a modelaxe das relacións de Redfield baseándose no «NCO» (Ríos *et al.*, 1998a); e as diferentes proporcións de carbohidratos, proteínas, lípidos, pigmentos fotosintéticos e sílice bioxénica en diatomeas, outras especies de fitoplancto, microheterótrofos e detritos na ría de Vigo (Ríos *et al.*, 1998b). Coa entrada do novo século, as relacións estequiométricas no mar deixaron de ser un foco da súa investigación e pasaron a ser unha ferramenta que lle permitiu caracterizar masas de auga (véxase o artigo de Carmen González Castro e Alicia Lavín neste mesmo libro), cuantificar o papel do océano na captura de CO_2 atmosférico (véxase neste libro o traballo de Xosé Antonio Padín Álvarez) e o seu almacenamento transitorio no océano (véxase o artigo de Gabriel Rosón Porto neste libro).

Revisando as relacións estequiométricas de Alfred C. Redfield

En 1963, Alfred C. Redfield, Bostwick H. Ketchum e Francis A. Richards formalizaron a ecuación estequiométrica que ligaba a composición elemental do fitoplancto mariño cos sales nutrientes que asimila (Redfield *et al.*, 1963):

$$106\ CO_2 + 16\ HNO_3 + H_3PO_4 + 122\ H_2O \rightarrow C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P + 138\ O_2 \qquad (1)$$

Pola contra, a reacción inversa describe a estequiometría dos procesos de remineralización da materia orgánica en condicións óxicas. Esta ecuación reflicte a existencia dunha proporción atómica C : N : P notablemente constante de 106 : 16 : 1 na composición elemental do fitoplancto mariño, proporción que se repite nos sales nutrientes. Tamén establece unha proporción atómica entre a composición do fitoplancto e o osíxeno disolto (O_2) que se produce (ou consome) durante a fotosíntese (ou remineralización) da materia orgánica.

Esta ecuación está entre as máis recoñecidas e empregadas na oceanografía biolóxica, química e bioxeoquímica moderna. Tal é a súa importancia que unha das distincións máis prestixiosas no eido da oceanografía, o Lifetime Achievement Award da Association for the Sciences of Limnology and Oceanography (ASLO), leva o nome de Alfred C. Redfield.

A pesar de ser unha ecuación impecable, que se segue ensinando e utilizando por todo o mundo a día de hoxe, pódese pulir un pouco se se mira con «ollos de químico». E niso precisamente estiveron a traballar Aida, o profesor Fraga e os seus colaboradores no Grupo de Oceanoloxía do Instituto de Investigacións Mariñas desde mediados dos anos 80 ata finais dos 90.

Por unha parte, a forma máis abundante de carbono que utiliza o fitoplancto non é o dióxido de carbono (CO_2) senón o bicarbonato (HCO_3^-), dado que maioritariamente o fitoplancto mariño dispón da enzima *anhidrasa carbónica*, que cataliza a disociación $HCO_3^- \rightarrow CO_2 + OH^-$. Nótese que o CO_2 representa unicamente o 0,7 % do carbono inorgánico, mentres que o HCO_3^- é o 91,3 % ao pH característico da auga de mar (arredor de 8,0). A este pH o nitrato está en forma iónica (NO_3^-) e a forma dominante de fosfato (88,4 %) é HPO_4^{2-}. Polo tanto, unha versión da Eq. (1) máis achegada á realidade do que ocorre no mar sería:

$$106\ HCO_3^- + 16\ NO_3^- + HPO_4^{2-} + 140\ H_2O \rightarrow C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P + 138\ O_2 + 124\ OH^- \qquad (2)$$

Esta forma de expresar a ecuación saliéntanos un aspecto importante que queda oculto na formulación de Redfield *et al.* (1963): durante a fotosíntese do fitoplancto libéranse ións hidroxilo (OH^-) ao medio, que se volve máis básico. Pola contra, durante os procesos de remineralización consumiranse OH^- e o medio volverase máis ácido. Este aspecto é relevante, dado que cando se estuda a acidificación

oceánica (véxase o artigo de Maribel I. García-Ibáñez neste mesmo libro) hai que discernir entre a diminución do pH debida aos procesos de remineralización e aquela debida á disolución de CO_2 atmosférico.

Para darlle un xiro máis á Eq. (2) aínda lle falta algo. A maior parte deses OH^- que se liberan durante a fotosíntese van ser neutralizados polo sistema tampón de auga de mar, debido maioritariamente ás parellas bicarbonato/carbonato e, en menor medida, ácido bórico/borato e outros ácidos débiles minoritarios. Unha forma sinxela, aínda que non de todo rigorosa, de incorporar este efecto tampón na Eq. (2) é sumarlle a ecuación:

$$124\ HCO_3^- + 124\ OH^- \rightleftharpoons 124\ CO_3^{2-} + 124\ H_2O \qquad (3)$$

Polo tanto, a ecuación estequiométrica completa quedaría así:

$$230HCO_3^- + 16\ NO_3^- + HPO_4^{2-} + 16\ H_2O \rightleftharpoons C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P + 138\ O_2 + 124\ CO_3^{2-} \qquad (4),$$

o que permite pensar non só en termos de estequiometría $O_2 : C : N : P$, senón tamén modelar os cambios de pH que se producen durante a fotosíntese e a remineralización da materia orgánica no mar.

Porén, a historia non remata aquí: a fórmula da composición elemental do fitoplancto mariño proposta por Redfield, $C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P$, considera que se trata esencialmente de carbohidratos e supón que todo o nitróxeno está en forma de amina ($R–NH_2$). Isto tradúcese nun número excesivo de H e O na fórmula da composición elemental e unha subestimación da produción de O_2 durante a fotosíntese ou do consumo durante a remineralización. Ríos e Fraga (1987) xa se decataron do problema no seu estudo sobre o fitoplancto na ría de Vigo, onde obtiveron unha composición elemental media de $C_{129}H_{234}O_{70}N_{17}P$, con relacións H : C e O : C de 1,81 e 0,54, cando as derivadas da fórmula de Redfield son 2,48 e 1,04. Profundando e buscando unha composición elemental representativa non só da ría de Vigo, senón do océano en xeral, chegaron unha década despois á fórmula canónica usada actualmente: $C_{106}H_{171}O_{42}N_{16}P$ (Fraga *et al.*, 1998). Non obstante, o impacto científico deste achado viuse eclipsado por Anderson (1996), que presentara unha fórmula practicamente igual ($C_{106}H_{175}O_{42}N_{16}P$) un par de anos antes.

Chegados ata aquí, réstanos un último paso por dar: substituír a composición elemental de Redfield, $C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P$, pola de Fraga *et al.* (1998), $C_{106}H_{171}O_{42}N_{16}P$, para presentar a expresión definitiva da estequiometría oceánica, esencial á hora de describir os ciclos bioxeoquímicos do O_2, C, N e P nos océanos:

$$106\ HCO_3^- + 16\ NO_3^- + HPO_4^{2-} + 94\ H_2O \rightarrow C_{106}H_{171}O_{42}N_{16}P + 149\ O_2 + 124\ OH^- \qquad (5)$$

Se ben a relación C : N : P de 106 : 16 : 1 non cambia respecto ao traballo orixinal de A. C. Redfield, cabe salientar que a produción (ou consumo) de osíxeno se ve incrementada nun 8 %. Isto marca unha gran diferenza cando se estudan os cambios no longo prazo do osíxeno ou do carbono nos océanos ou se quere diferenciar o carbono procedente dos procesos bioxeoquímicos do carbono de orixe antropoxénica (véxase o artigo de Gabriel Rosón Porto neste mesmo libro).

Na procura dunha formulación máis universal dos trazadores de Wallace S. Broeker

Despois de que Harald S. Svedrup publicase o seu famoso tratado *The Oceans: their Physics, Chemistry and General Biology* (Sverdrup *et al.*, 1942), a «biblia» da oceanografía, as masas de auga do océano profundo caracterizábanse a partir de temperatura e salinidade. Con estas variables pódese resolver a mestura de ata tres masas de auga. Porén, que sucede cando se mesturan máis de tres? Ou cando a salinidade ou a temperatura non presentan contrastes claros entre masas de auga?

É aquí onde cobra relevancia a figura de Wallace S. Broecker, quen, a partir da Ec. (1) de Redfield *et al.* (1963), propuxo unha sinxela ecuación diferencial para expresar que os cambios de concentración de nitrato ($[NO_3^-]$) e osíxeno disolto ($[O_2]$) non son independentes, senón que están ligados pola relación de Redfield O_2 : N, á que chamaremos R_N. Esta relación ten un valor de 8,6 mol O_2 mol N^{-1} (= 138/16) de acordo coa Ec. (1) de Redfield:

$$d[O_2] / d[NO_3^-] = -R_N = -8{,}6 \qquad (6)$$

Integrando a Ec. (6) obtense que:

$$[O_2] = -R_N \cdot [NO_3^-] + \text{«CTE»} = -8{,}6 \cdot [NO_3^-] + \text{«CTE»} \quad (7)$$

«CTE» é sinxelamente a constante resultante dunha integral indefinida. Reorganizando, finalmente temos que:

$$\text{«CTE»} = \text{«NO»} = [O_2] + R_N \cdot [NO_3^-] = [O_2] + 8{,}6 \cdot [NO_3^-] \quad (8)$$

Isto vénnos a dicir que, mentres que $[O_2]$ e $[NO_3^-]$ dunha masa de auga cambiarán segundo esta vaia circulando polo océano, a suma $[O_2] + R_N \cdot [NO_3^-]$ manterase constante no tempo e no espazo, cun valor característico para cada masa de auga. Así naceu un dos trazadores conservativos fundamentais en oceanografía química, ao que Broecker bautizou como «NO». Facendo un razoamento similar coa relación O_2 : P, Broecker (1974) tamén chegou ao trazador conservativo «PO»:

$$\text{«PO»} = [O_2] + R_P \cdot [H_2PO_4^-] = [O_2] + 138 \cdot [HPO_4^{2-}] \quad (9)$$

E uns poucos anos máis tarde, seguindo esta mesma lóxica, Broecker e Peng (1982) formalizaron un terceiro trazador conservativo, o «CO», que xa introduciran en Broecker (1974):

$$\text{«CO»} = [O_2] + R_c \cdot ([\Sigma CO_2] - 0{,}5 \cdot (TA + NO_3^-]) = \\ = [O_2] + 1{,}30 \cdot ([\Sigma CO_2] - 0{,}5 \cdot (TA + [NO_3^-]) \quad (10)$$

Por que no caso do «CO» á concentración de carbono inorgánico ($[\Sigma CO_2]$) se lle resta o termo $0{,}5 \cdot (TA + NO_3^-])$? O ΣCO_2 non só se produce durante a degradación da materia orgánica, senón tamén durante a disolución das estruturas de carbonato cálcico ($CaCO_3$), proceso que non consome osíxeno pero si aumenta drasticamente a alcalinidade (TA), é dicir, a capacidade tampón da auga de mar, ao aumentar a concentración de ión carbonato (CO_3^{2-}). A suma $TA + [NO_3^-]$ só depende dos cambios

de TA debidos á disolución de $CaCO_3$, non da degradación da materia orgánica, e estes cambios son estequiometricamente a metade do incremento de ΣCO_2 debido á disolución de $CaCO_3$ (Ríos *et al.*, 1989), de aí o coeficiente de 0,5.

Ao igual que no caso de Alfred C. Redfield, tamén existe una distinción que leva o nome de Wallace S. Broecker para honrar o seu legado en xeociencias mariñas, oceanografía química e paleoceanografía: a Wallace S. Broeker Medal, outorgada por The Oceanographic Society.

Na sección anterior partimos da Ec. (1) de Redfield *et al.* (1963) para chegar á máis refinada Ec. (5) de Fraga *et al.* (1998). Dado que W. S. Broecker se baseou na Ec. (1) para calcular os parámetros R_N, R_P e R_C, faise necesario actualizalos segundo a Ec. (5), o que dá como resultado R_N = 9,3 (= 149/16), R_P = 149 (= 149/1) e R_C = 1,41 (= 149/106).

Por outra parte, estes novos trazadores conservativos «NO», «PO» e «CO» son axeitados para estudar a mestura das masas de auga do océano profundo, onde practicamente o 100 % do nitróxeno inorgánico se atopa como NO_3^- e hai O_2 suficiente para degradar a materia orgánica. Esta situación dáse na maior parte do océano, se ben co cambio climático as zonas de mínimo de osíxeno están en franca expansión. Porén, Ríos *et al*. (1989), ao querer aplicar estes trazadores conservativos ao estudo das masas de auga nas costas de Galicia, atopáronse cun problema: alén do NO_3^-, existen concentracións significativas de nitrito (NO_2^-) e amonio (NH_4^+), que se producen durante a degradación da materia orgánica unha vez que a auga oceánica aflora na plataforma continental e termina por entrar nas rías e que tamén son utilizados polo fitoplancto para realizar a fotosíntese.

Tocaba, pois, facer axustes nos trazadores transitorios «NO», «PO» e «CO» para producir unha versión depurada deles, de validez máis universal. E así se chegou ao «NOcor», «POcor» e «COcor» de Ríos *et al.* (1989):

$$«NOcor» = ([O_2] - 0{,}5 \cdot [NO_2^-] - 2 \cdot [NH_4^+]) + 9{,}3 \cdot ([NO_3^-] + [NO_2^-] + [NH_4^+])$$

$$«POcor» = ([O_2] - 0{,}5 \cdot [NO_2^-] - 2 \cdot [NH_4^+]) + 149 \cdot [HPO_4^{2-}]$$

$$\text{«COcor»} = ([O_2] - 0{,}5 \cdot [NO_2^-] - 2 \cdot [NH_4^+]) + \\ + 1{,}41 \cdot ([\Sigma CO_2] - 0{,}5 \cdot (TA + [NO_3^-] + 0{,}5 \cdot [NO_2^-] - [NH_4^+]) \quad (11)$$

Por unha banda, aplícase unha corrección á concentración de O_2, calculando a $[O_2]$ que resultaría se todo o NO_2^- e NH_4^+ se oxidase a NO_3^-. Os coeficientes 0,5 e 2 saen das Ec. (12) e (13):

$$NO_2^- + 0{,}5\ O_2 \rightarrow NO_3^- \quad (12)$$

$$2\ CO_3^{2-} + NH_4^+ + 2\ O_2 \rightarrow NO_3^- + H_2O + 2\ HCO_3^- \quad (13)$$

Por outra banda, no «NOcor», substituíuse a concentración de NO_3^- pola suma de NO_3^-, NO_2^-e NH_4^+, mantendo o R_N en 9,3 dado que a concentración de O_2 se corrixiu como se todo o nitróxeno inorgánico estivese en forma de nitrato.

Por último, no caso do «COcor», cando a única forma de nitróxeno inorgánico é o NO_3^-, a suma TA + $[NO_3^-]$ só depende dos cambios de TA debidos á disolución de $CaCO_3$ (Ec. 10). Para o caso do NO_2^- sería TA + 0,5 · $[NO_2^-]$ e para o do NH_4^+ resultaría TA – $[NH_4^+]$. Polo tanto, onde coexistan as tres formas de nitróxeno inorgánico, a suma que só depende da disolución de $CaCO_3$ sería TA + $[NO_3^-]$ + 0,5 · $[NO_2^-]$ – $[NH_4^+]$, tal como expresa a Ec. (11).

Aproveitando que os trazadores de Wallace S. Broecker non sempre funcionan

Se coidabas que a historia estaba a rematar, aínda lle queda un terceiro acto, se cadra o máis innovador. Aida, o doutor Fraga e os seus colaboradores do Grupo de Oceanoloxía, decatáronse de que máis relevante que refinar ecuacións ou trazadores conservativos era mirar alí onde as ecuacións non se cumpren e os trazadores deixan de ser conservativos.

O carácter conservativo do «NOcor», «POCcor» e «COcor» dítao fundamentalmente o estables que sexan os parámetros R_N, R_P e R_C arredor dos valores canónicos de 9,3 mol O_2 mol N^{-1}, 149 mol

O_2 mol P^{-1} e 1,41 mol O_2 mol C^{-1}, derivados da Ec. (5) de Fraga *et al.* (1998). Así, estes valores de R_N, R_P e R_C cúmprense cando a composición elemental do fitoplancto mariño é $C_{106}H_{171}O_{42}N_{16}P$.

Pero, é sempre esta a composición do fitoplancto mariño? A resposta rápida é, rotundamente, non. Trátase dunha composición media representativa a escala espacial global e a escala temporal, polo menos, anual. No entanto, á escala espacial local ou ao longo da sucesión estacional do fitoplancto característica dos ecosistemas mariños temperados, prodúcense cambios na composición elemental do fitoplancto, que se traducen en cambios na Eq. (5) de Fraga *et al.* (1998) e, polo tanto, nos coeficientes R_N, R_P e R_C.

Para que Fraga *et al.* (1998) puideran establecer a súa fórmula da composición media do fitoplancto mariño foi necesario o traballo de Fraga e Pérez (1990), no que estableceron a composición media dos principais grupos de biomoléculas que constitúen o fitoplancto: carbohidratos, lípidos, proteínas, compostos de fósforo e pigmentos fotosintéticos (táboa 1). Así, a famosa fórmula $C_{106}H_{171}O_{42}N_{16}P$ resulta dunha combinación única deses cinco grupos de biomoléculas nunhas proporcións determinadas: 24,4 % de carbohidratos, 16,5% de lípidos, 45,1 % de proteínas, 12,0 % de compostos de fósforo e 2 % de pigmentos fotosintéticos. Calquera variación destas proporcións alterará a fórmula media e os coeficientes de Redfield. Pois ben, Fraga *et al.* (1998), asumindo que os cambios da composición media do fitoplancto mariño se deben a cambios nas proporcións dos cinco grupos de biomoléculas e non a cambios na composición destas (que se asumen invariantes), foron capaces de establecer os límites teóricos de R_C e R_N, baseándose nos valores destes coeficientes propios de cada unha das biomoléculas (táboa 1) e as proporcións en que se pode atopar no fitoplancto. Así, o valor de R_C pode variar entre 1,0 (característico da síntese/remineralización de carbohidratos) e 1,6 (característico da síntese/remineralización de proteínas) e o de R_N entre 5,6 (característico da síntese/remineralización de proteínas) e infinito (característico da síntese/remineralización de carbohidratos ou lípidos). Ademais, para un valor dado de R_C, non todos os valores de R_N son posibles, e viceversa.

Así, esta constitúe unha potente ferramenta para avaliar a consistencia coa relación de Redfield dos traballos publicados sobre estequiometría O_2 : C : N : P no océano. Hai unha morea de traballos que quedan fóra destes límites teóricos, incluído o de Redfield *et al.* (1963), algo que non

debera estrañarnos dado que definiron a composición do fitoplancto como unha mestura de carbohidratos e aminas, que non responde á realidade.

Táboa 1. Composición (fórmula química) dos carbohidratos, lípidos, proteínas, pigmentos fotosintéticos e compostos de fósforo do fitoplancto mariño. Indícase a contribución de cada grupo de compostos á composición media do fitoplancto, así como o valor dos coeficientes R_C e R_N para cada grupo de biomoléculas. Datos tomados de Fraga e Pérez (1990) e Fraga *et al.* (1998).

	Fórmula	**% (w/w)**	**R_C**	**R_N**
Carbohydrates	$C_6H_{10}O_5$	24,5 %	1,00	∞
Lipids	$C_{53}H_{89}O_6$	16,5 %	1,36	∞
Proteínas	$C_{139}H_{2170}O_{45}N_{39}S$	45,1 %	1,59	5,64
Comp. de fósforo	$C_{45}H_{76}O_{31}N_{12}P_5$	12,0 %	1,55	13,95
Pigmentos	$C_{46}H_{52}O_5N_4Mg$	2,0 %	1,35	15,50
Fitoplancto	**$C_{106}H_{171}O_{42}N_{16}PS_{0,3}$**	**100,0 %**	**1,41**	**9,33**

Coñecer as fórmulas químicas dos cinco grupos de biomoléculas tamén deu pé a estudar situacións como a dunha marea vermella do dinoflaxelado *Gymnodinium catenatum* (Fraga *et al.*, 1992), unha proliferación primaveral de diatomeas (Ríos *et al.*, 1998a) e outra marea vermella do ciliado fotosintético *Mesodinium rubrum* (Fraga *et al.*, 1999) no sistema de afloramento de Galicia, nas que a síntese da materia orgánica non segue as proporcións de Redfield.

Gymnodinium catenatum migra verticalmente e permanece durante o día na superficie, onde o N inorgánico está esgotado, sintetizando e acumulando carbohidratos e producindo osíxeno (figura 1). Pola noite migra cara a nutriclina, onde está o N e P inorgánico que necesita para sintetizar proteínas e compostos de fósforo, usando a enerxía acumulada nos carbohidratos e,

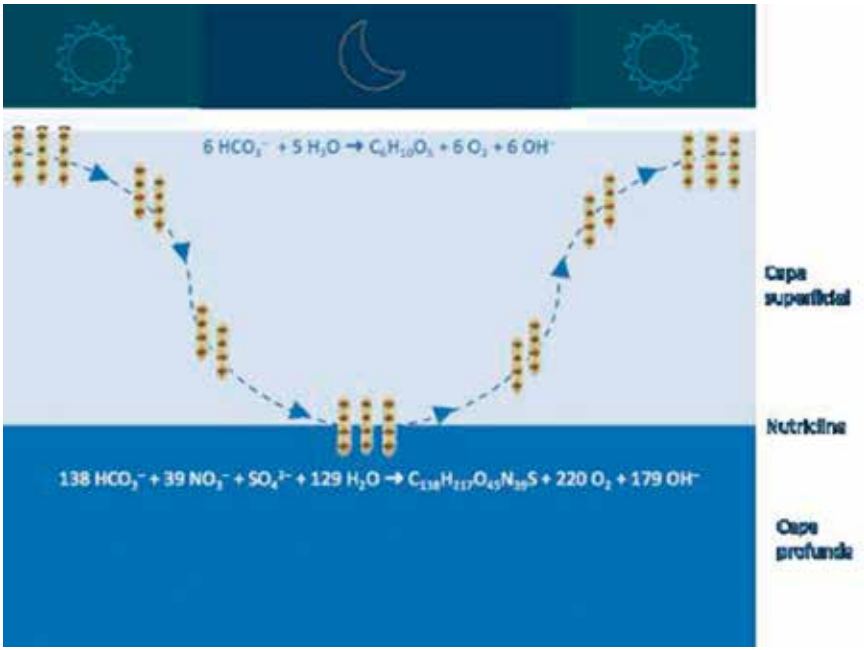


Figura 1. Representación esquemática da migración vertical diaria do dinoflaxelado *Gymnodinium catenatum*. Polo día está na superficie, onde sintetiza carbohidratos ($C_6H_{10}O_5$), e pola noite migra cara á nutriclina, onde realiza a síntese das proteínas ($C_{138}H_{217}O_{45}N_{39}S$), ademais de compostos de fósforo e pigmentos fotosintéticos

polo tanto, sen producir osíxeno. Ao separarse na vertical a síntese de carbohidratos na superficie e a de proteínas e compostos de P na nutriclina, as variables «COcor» e «NOcor» (Ec. 11) deixan de comportarse conservativamente e cómpre definir novas variables conservativas, o «NCO» o «PCO», completamente orixinais, marca da casa (figura 2a; Fraga *et al.*, 1992):

$$\text{«NCOcor»} = \text{«NO»} + (\text{«CO»} - \text{«NO»})/Rc$$

$$\text{«PCOcor»} = \text{«PO»} + (\text{«CO»} - \text{«PO»})/Rc \qquad (14)$$

Este mesmo razoamento aplicouse no traballo sobre a migración vertical de *Mesodinium rubrum* (Fraga *et al.* [1998]). Durante a proliferación primaveral de diatomeas na plataforma continental de Galicia, tamén se observou un comportamento similar, caracterizado pola síntese de carbohidratos na superficie e proteínas e compostos de fósforo na nutriclina (figura 2b). É sabido que as diatomeas cun exceso de carbohidratos afunden máis rápido e, unha vez que chegan á nutriclina, poden asimilar N inorgánico (Ríos *et al.*, 1998a). A diferenza do que ocorre cos dinoflaxelados ou co *Mesodinium rubrum*, as diatomeas non teñen a posibilidade de migrar verticalmente, só de moverse pasivamente-

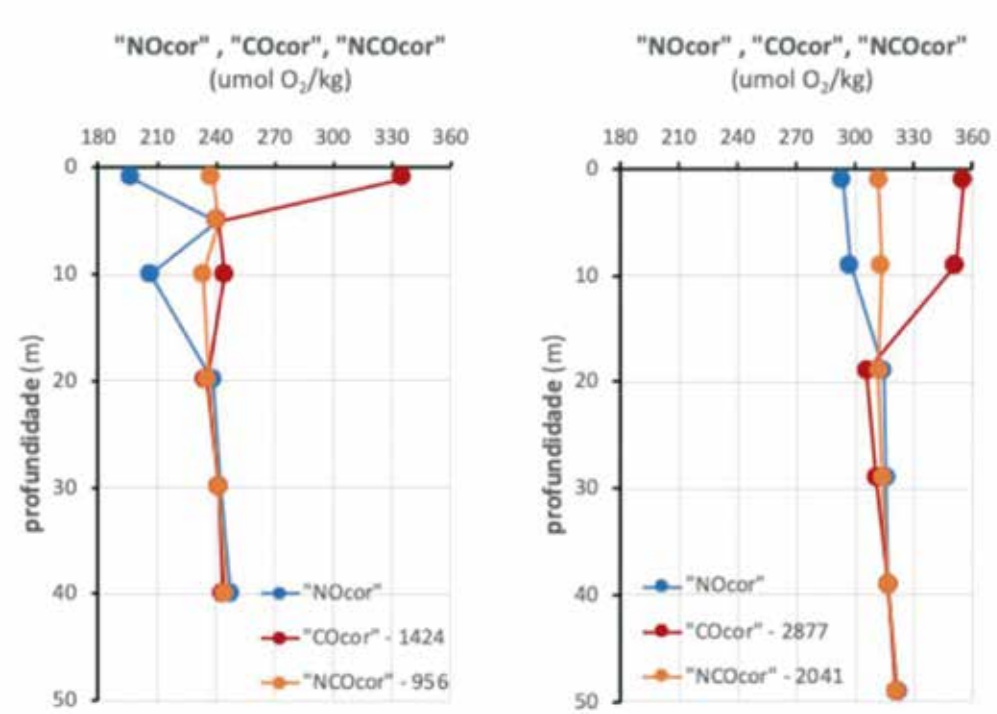


Figura 2. Distribución vertical dos parámetros «NOcor», «COcor» e «NCOcor» durante unha marea vermella o 3 de outubro de 1986 na campaña GALICIA IX (panel da esquerda) e durante unha proliferación primaveral das diatomeas *Rhizosolenia delicatula*, *Chaetoceros socialis*, *Pseudo-nitzschia cf. seriata*, *Leptocylindrus danicus* e *minimus*, o 14 de maio de 1991 durante a campaña GALICIA XI (panel da dereita). As desviacións de Redfield reflíctense nos perfís verticais de «NOcor» e «COcor»; mentres tanto, o «NCOcor» mantense constante coa profundidade. Tomado de Ríos *et al*. (1998a)

por afundimento gravitacional ou desprazamentos verticais asociados aos episodios de afloramento e afundimento.

Finalmente, o traballo que pecha esta década dedicada á estequiometría da síntese e remineralización da materia orgánica (Ríos *et al.*, 1998b), fai de novo uso das fórmulas químicas medias dos cinco grupos de biomoléculas da táboa 1 para deducir a composición bioquímica das diatomeas, outros grupos de fitoplancto, microheterótrofos e detritos na ría de Vigo, e a súa variabilidade espacial (lonxitudinal, vertical) e temporal (estacional).

A pegada que deixou esta etapa inicial impregnou o resto das liñas de investigación nas que Aida estivo envolvida durante a súa carreira, nas que fixo uso recorrente das relacións estequiométricas entre O_2, ΣCO_2, TA, NH_4^+, NO_2^-, NO_3^-, HPO_4^{2-} e silicato (H_2SiO_4), nas rías e na plataforma continental de Galicia e, sobre todo, no océano Atlántico Norte e Sur, cara ao que se enfocou no novo século.

Referencias bibliográficas

Anderson S.A. (1995). On the hydrogen and oxygen content of marine phytoplankton. Deep-Sea Research, 42, 1675-1680.

Broecker W.S. (1974). «NO», a conservative water-mass tracer. Earth and Planetary Science Letters, 23, 100-107.

Broecker W.S., Peng T.-H. (1982). Tracers in the Sea. Lamont-Doherty Geological Observatory, Columbia University, New York, 690 pp.

Fraga F., Pérez F.F. (1990). Transformaciones entre composición química del fitoplancton, composición elemental y relación de Redfield. Scientia Marina, 54, 69-76.

Fraga F., Pérez F.F., Figueiras F.G., Ríos A.F. (1992). Stoichiometric variations of N, P, C and O_2 during a Gymnodinium catenatum red tide and their interpretation. Marine Ecology Progress Series, 87, 123-134.

Fraga F., Ríos A.F., Pérez F.F., Figueiras F.G. (1998). Theoretical limits of oxygen:carbon and oxygen:nitrogen ratios during photosynthesis and the mineralisation of the organic matter in the sea. Scientia Marina, 62, 161-168.

Fraga F., Ríos A.F., Pérez F.F., Estrada M., Marrasé C. (1999). Effect of upwelling pulses on excess carbohydrate synthesis as deduced from nutrient, carbon dioxide and oxygen profiles. Marine Ecology Progress Series, 189, 65-75. https://doi.org/10.3354/meps189065

Redfield A.C., Ketchum B.H., Richard F.A. (1963). The influence of organisms on the composition of sea-water, en: M.N. Hill (Ed.), The sea, Vol. 2, Interscience Publishers, New York, 26-77.

Ríos A.F., Fraga F. (1987). Composición química elemental del plancton marino. Investigación Pesquera, 51, 619-632.

Ríos A.F., Fraga F., Pérez F.F. (1989). Estimation of coefficients for the calculation of «NO», «PO» and «CO», starting from the elemental composition of natural phytoplankton. Scientia Marina, 53, 779-784.

Ríos A.F., Fraga F., Figueiras F.G., Pérez F.F. (1998). A modelling approach to the Redfield ratio deviations in the ocean. Scientia Marina, 62, 169-176.

Ríos A.F., Fraga F., Pérez F.F., Figueiras F.G. (1998). Chemical composition of phytoplankton and particulate organic matter in the Ría de Vigo (NW Spain). Scientia Marina, 62, 257-271. https://doi.org/10.3989/scimar.1998.62n3257.

Sverdrup H.U., Johnson M.W., Fleming R.H. (1942). The Oceans: Their Physics, Chemistry, and General Biology. Prentice-Hall, Inc., New York.

A linguaxe das masas de auga

Carmen González Castro
Investigadora científica
CSIC - Instituto de Investigacións Mariñas

Alicia Lavín
Investigadora científica xubilada
IEO, Centro Oceanográfico de Santander

Búscase químico que traballe só

—«Búscase químico que saiba traballar só.»
—E dicían así? Non dicían nada máis?
—Si, así. Búscase químico que saiba traballar só. Iso era o que buscaban.

Corría o ano 2012 e no laboratorio de oceanografía do Instituto de Investigacións Mariñas de Vigo debiamos de traballar unhas corenta persoas, entre o cadro de persoal fixo, o persoal con cargo a proxectos e o persoal en formación. Eu non saía do meu abraio, e o mellor é que non era a primeira vez que o doutor Fernando Fraga me relataba como foran os seus comezos no Consello Superior de Investigacións Científicas.

No ano 1953, o actual Instituto de Investigacións Mariñas (IIM-CSIC), daquela Centro Atlántico do Instituto de Investigaciones Pesqueras, localizábase no Colexio Alemán. Nas fotografías vese un harmonioso edificio de amplas fiestras, situado fronte ao porto do Berbés. Directo desde a Facultade de Química da Universidade de Santiago de Compostela, o Dr. Fraga iniciou a súa nova etapa en Vigo e foi alí onde comezou a súa singradura nun medio, o mariño, que lonxe ficaba dos compostos alcaloides en que traballara durante a elaboración da súa tese de doutoramento. Lonxe?

O Dr. Fernando Fraga, motivado por unha curiosidade incesante e unha mente inqueda, formulouse preguntas nese medio mariño no que a ecuación química fundamental é a fotosíntese e a súa inversa, a remineralización da materia orgánica (principalmente a oxidación aerobia). De

inorgánico a orgánico e de volta a inorgánico no medio da auga do mar. A auga do mar, curioso medio! O químico orgánico de formación atópase ante a necesidade de medir a concentración de nutrientes inorgánicos na auga do mar.

Poucos anos despois, Carmen Mouriño comeza a traballar co Dr. Fraga e, admirada polos seus coñecementos e polas súas ensinanzas, compaxínao cos estudos en Química e centra o seu traballo de licenciatura na determinación de nitratos na auga do mar (Mouriño 1983, Mouriño e Fraga 1985). A Carmen Mouriño séguelle Aida Fernández Ríos, quen se une ao traballo desenvolvido polo Dr. Fraga a finais dos setenta. Contaxiada polo entusiasmo científico, Aida decide iniciar a súa licenciatura en Bioloxía e, despois, a súa tese de doutoramento, defendida en Santiago de Compostela en 1992 e dirixida polo Dr. Fraga.

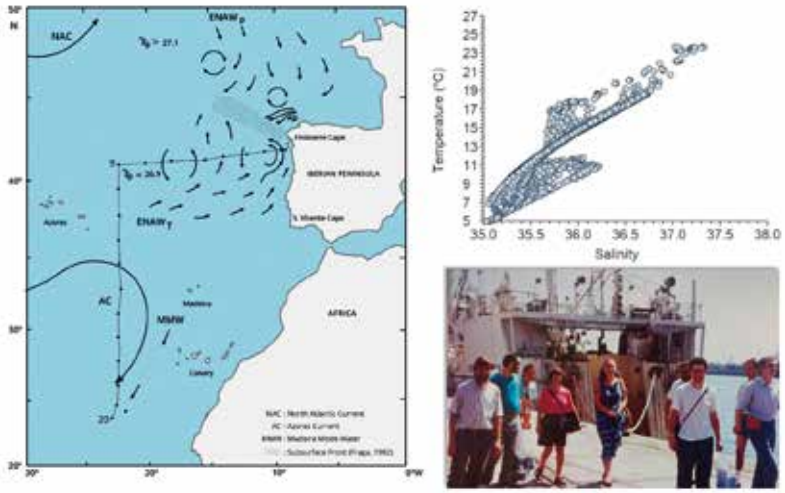


Figura 1. Mapa das estacións oceanográficas da campaña ANA co esquema proposto de circulación da ENACW de orixe subpolar e subtropical (ENAW$_P$ e ENAW$_T$ no mapa; adaptado de Ríos *et al*. 1992). (a) Diagrama T-S das estacións en que se tomaron mostras. (b) Fotografía tomada no Río de Xaneiro (O Brasil), no porto onde se atoparon os membros do grupo de Oceanografía que foran na campaña ANA (Trinidad Rellán, Aida F. Ríos, Yolanda Pazos e Ramón Penín) e os participantes na seguinte campaña con destino á Antártida (Ricardo Prego, Francisco G. Figueiras e Fiz F. Pérez)

Aquel equipo liderado polo Dr. Fraga proponse entender as características termohalinas e químicas nas costas de Galicia e a distribución das distintas masas de auga nesta parte do Atlántico nororiental. Así, en novembro de 1988, Aida Fernández Ríos lidera, a bordo do buque oceanográfico Profesor Siedlecki, a campaña ANA, unha campaña oceanográfica ao longo do Atlántico co fin de caracterizar as masas de auga centrais. En concreto, o fin é analizar a masa de auga central noratlántica (NACW, North Atlantic Central Water), xa que se trata da auga que aflora nas rías galegas e que causa a súa elevada produción primaria, como mostrara o Dr. Fraga en 1981 (Fraga 1981). Os transectos da campaña ANA resultaron idóneos para analizar a variabilidade termohalina na rexión do Atlántico situada ao leste da dorsal mesoatlántica, tal como se explica en Ríos *et al.* 1992. Nese traballo descríbese a circulación da auga central ao leste da dorsal mesoatlántica, motivo polo cal se especifica a presenza de auga central nororiental coa sigla ENACW (Eastern North Atlantic Central Water). No esquema de circulación composto neste traballo (figura 1) móstranse dúas variedades distintas de ENACW: unha de orixe subpolar que circula cara ao sur ($ENACW_{sp}$) e outra de orixe subtropical ($ENACW_{st}$), formada ao norte da Corrente dos Azores e que circula cara ao nordeste, cara ás costas da Península Ibérica.

Cando o primeiro CTD

A verdade é que foi toda unha aventura; xamais estivera nunha campaña oceanográfica. Aquela mañá de maio de 1991, varios integrantes do equipo de oceanografía do IIM a bordo do buque oceanográfico Investigador-S levantabamos áncoras do porto de Vigo rumbo ao norte. Dezasete anos despois da primeira campaña GALICIA I (Manríquez *et al.* 1976), levábase a cabo a campaña oceanográfica GALICIA XI, e desta vez iamos estrear a nosa propia sonda de salinidade-temperatura-profundidade, o CTD Seabird 9/11. A campaña transcorreu conforme o agardado e, á altura do cabo Fisterra, tivemos que sucumbir e, por prudencia, evitar tomar mostras cando os ventos foron máis intensos.

De volta a Vigo, tocaba procesar os datos, preparar as bases de datos para logo analizalos. Afloramento hóuboo, e intenso, seguido tamén dun período de relaxación do vento fronte ás Rías Baixas. Tratábase de analizar as características termohalinas das augas afloradas, de identificar a presenza

de ENACW de orixe subpolar ou subtropical. A sorpresa foi cando os diagramas T-S mostraron que os volumes de ENACW, para toda a escala de temperaturas das augas centrais, eran moito máis salinos que os descritos con anterioridade por Ríos *et al.* (1992). Equivocarámonos con este CTD acabado de estrear? O caso é que eran moito máis salinos e que esta pauta se repetía en todos os transectos ao longo das costas galegas (Castro *et al.* 1994).

Sucedeu que tamén por esas mesmas datas estaba a realizarse a campaña inglesa VIVALDI 1991 a bordo do RRS Charles Darwin, na que Aida Fernández Ríos participaba levando a cabo as medicións de pH e alcalinidade. Grazas á colaboración de Aida cos investigadores Raymond Pollard e James Read do Southampton Oceanographic Centre (O Reino Unido), tivemos ocasión de comparar os diagramas T-S de estacións oceanográficas próximas visitadas por eles e por nós. Isto permitiunos comprobar que nos atopabamos ante un incremento da salinidade dos volumes de ENACW. A campaña VIVALDI 1991 abranguía a rexión do Atlántico Norte ao leste da dorsal mesoatlántica, entre os 39° e os 50° N, polo que proporcionaba unha descrición máis ampla dos volumes de augas centrais, non só de ENACW, senón tamén de Auga central do Atlántico noroccidental (WNACW, Western North Atlantic Central Water; Pollard *et al.* 1996). De feito, con base na análise termohalina e de circulación, Pollard *et al.* (1996) demostraron a presenza de franxas alternas de WNACW e ENACW en desprazamento cara ao leste e oeste, respectivamente, entre os 20° e os 35° de lonxitude oeste.

A cuestión é que estes estudos (Castro *et al.* 1994, Pollard *et al.* 1996) evidenciaban, en comparación cos estudos previos sobre a ENACW, unha variabilidade nas propiedades termohalinas e apuntaban a necesidade de avaliar de forma temporal as características destas masas de auga. Tomando como referencia o nivel isopícnico de 27,1 (densidade da auga de 1027,1 kg/m^3) e recompilando as características de temperatura e salinidade no océano adxacente á costa oeste galega durante un período de vinte anos, Pérez *et al.* (1995) analizaron a evolución temporal na auga central. Isto permitiulles comprobar que tamén a mediados da década de 1970 houbo un aumento de salinidade similar ao rexistrado en 1991, seguido dun descenso de salinidade que se mantivo ata 1990. Posteriormente, Pérez *et al.* (2000) analizaron as posibles causas desta variabilidade e sinalaron que o réxime de ventos e os patróns de precipitación afectan ás características termohalinas das masas de auga centrais no seu momento de formación.

Que nos contan as masas de auga? Caracterización bioxeoquímica

No traballo de Ríos *et al.* (1992) expuxérase unha visión global das dúas variedades de ENACW de orixe subtropical e subpolar no Atlántico nororiental, baseada nos diagramas T-S. Ademais, tendo en conta estas propiedades termohalinas e as distribucións de densidade, analizárase a circulación das distintas variedades de ENACW.

O paso seguinte era caracterizar desde un punto de vista bioxeoquímico as masas de auga que circundan as costas galegas, non só as de ENACW, fundamentais para comprender o afloramento no noroeste da Península Ibérica, senón tamén as masas de auga máis profundas. Para isto recompiláronse os datos das campañas GALICIA V (novembro de 1982), GALICIA VI (decembro de 1983) e GALICIA VIII (xullo de 1984), realizadas ao longo das costas galegas (Pérez *et al.* 1993). A diferenza das anteriores campañas GALICIA, estas tres tiñan un marcado enfoque oceanográfico e nelas, ademais das variables termohalinas, determináronse as concentracións de nutrientes inorgánicos e de osíxeno, o pH e a alcalinidade —estes dous últimos valores empregados para coñecer a concentración de carbono inorgánico disolto (CID)—. Todas estas observacións oceanográficas eran idóneas para coñecer as concentracións medias de nutrientes inorgánicos, osíxeno e CID das distintas masas de auga. A aproximación empregada parte da idea de que os diagramas T-S nos indican non só cales son as masas de auga existentes, senón tamén como se mesturan entre elas (figura 2). Así, do mesmo modo que as propiedades termohalinas se poden explicar por mestura, considérase que unha parte da concentración de nutrientes inorgánicos, osíxeno e CID tamén se explica por mestura. Con todo, hai outra parte da concentración destas variables químicas que non está asociada ás propiedades termohalinas, pero si a unha diferenza rexional nos procesos de remineralización da materia orgánica na área de estudo. Ao aplicar esta aproximación de mestura, chégase a un valor medio da concentración de nutrientes inorgánicos, osíxeno e CID para as distintas masas de auga en toda a columna de auga.

Posteriormente, Castro *et al.* (1998) ampliaron a zona de estudo ao Atlántico noroccidental (39-48° N, 11-27° W) e corroboraron os resultados obtidos con anterioridade por Pérez *et al.* (1993). Evidenciouse que as dúas variedades de ENACW se diferencian non só polas súas propiedades termohalinas, senón tamén polas súas características bioxeoquímicas. Os valores medios das concentracións

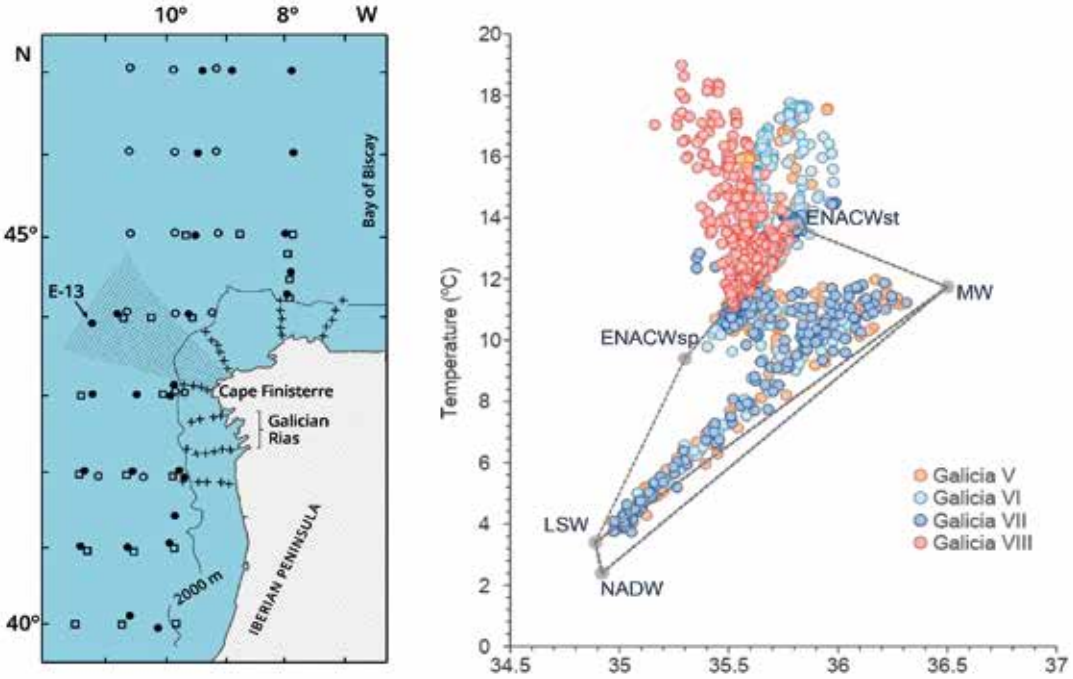


Figura 2. Posicións das estacións nas campañas GALICIA V (novembro de 1982, cadrados baleiros), GALICIA VI (decembro de 1983, círculos baleiros), GALICIA VII (febreiro de 1984, círculos cubertos) e GALICIA VIII (xullo de 1984; cruzamentos). Móstrase a zona frontal subsuperficial (sombreada) preto do cabo Fisterra (a). Diagramas T-S para todas as estacións en que se tomaron mostras, cos tipos de auga empregados para o modelo de mestura; ENACW de orixe subpolar e subtropical (ENACWsp e ENACWst respectivamente), Auga Mediterránea (MW), Auga do Mar do Labrador (LSW) e Auga Profunda do Atlántico Norte (NADW) (b) (adaptado de Pérez *et al*. 1993)

de nutrientes inorgánicos e CID son máis elevados para a ENACW de orixe subpolar que para a de orixe subtropical. Así mesmo, no que respecta ás masas de auga profundas, chama a atención a presenza de auga mediterránea, que, ademais dunha elevada salinidade, presenta os niveis de osíxeno máis baixos de todas as masas de auga presentes na zona. Identifícanse, ademais, volumes de Auga do Mar do Labrador con baixas salinidades e con altos niveis de osíxeno, en claro contraste coa Auga Mediterránea.

Estes primeiros traballos sentarían as bases desta aproximación ao estudo bioxeoquímico das masas de auga, que se aplicaría noutras rexións do Atlántico oriental, como veremos a continuación,

e que ademais evolucionará cara a unhas aproximacións máis complexas (Álvarez *et al.* 2004, Velo *et al.* 2010, De la Paz *et al.* 2017, García-Ibáñez *et al.* 2018).

ENACW e a dinámica do afloramento costeiro en Galicia

Galicia é mar, e o sector pesqueiro, incluída a acuicultura do mexillón, é un sinal de identidade desta rexión mariñeira por natureza. Difícil sería explicar a realidade socioeconómica de Galicia sen ter en conta o afloramento da ENACW, esas masas de auga modais frías e con altos niveis de nutrientes inorgánicos que, advectadas á superficie do mar polos ventos do norte, favorecen a proliferación do fitoplancto.

A partir da década dos 2000 lévase a cabo unha serie de investigacións máis específicas centradas na ENACW, en moitos casos revisando as observacións oceanográficas existentes arredor de Galicia. Estes traballos buscan analizar as características bioxeoquímicas dos distintos volumes de ENACW tendo en conta a dinámica desta rexión de afloramento costeiro e mesmo preguntarse ata que punto esta dinámica controla as características bioxeoquímicas da ENACW.

Así, Pérez *et al.* (2001) abordan como o sistema de correntes de Portugal distribúe os distintos volumes de ENACW de orixe subtropical e subpolar. Os resultados mostran que a Corrente de Portugal transporta volumes de $ENACW_{sp}$ acabada de formar —e, xa que logo, con elevados niveis de osíxeno— cara ao sur. Por outra banda, a Contracorrente de Portugal transporta cara ao norte, ao longo do noiro continental, $ENACW_{st}$ con menos concentración de osíxeno. Deste modo, prodúcese un intercambio de augas centrais entre a Corrente de Portugal e a Contracorrente de Portugal a través dunha circulación de mesoescala, isto é, mediante a formación de remuíños ciclónicos de mesoescala superpostos ao esquema xeral de circulación.

Interesa tamén realizar unha análise conxunta da estacionalidade do afloramento costeiro na costa galega (Álvarez-Salgado *et al.* 2003). Trátase de abarcar non só as Rías Baixas, senón tamén a plataforma costeira adxacente desde os 40° ata os 43° N. Para isto recorreuse a medicións recollidas en distintas campañas oceanográficas nesta rexión, incluídas sete campañas en distintas épocas estacionais, desde decembro de 1983 a xuño de 1998 (táboa 1 en Álvarez-Salgado *et al.* 2003). A imaxe

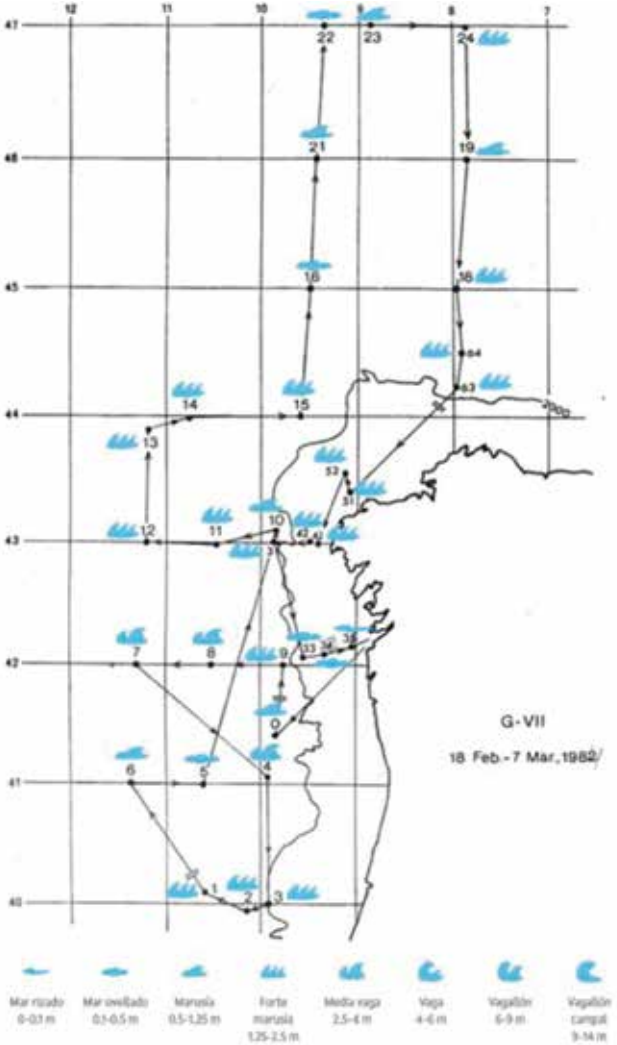


Figura 3. Itinerario da campaña GALICIA VII. Os sinais –||– no percorrido indican unha interrupción no traballo debido ao mal tempo

composta de todas estas campañas analiza o ciclo estacional desde a mestura invernal ata a marcada estratificación estival e a intensificación da Contracorrente de Portugal na época outonal. Ademais, mostra como este ciclo de mestura e estratificación modula as características químicas (contido de nutrientes inorgánicos, osíxeno e CID) e biolóxicas (concentración de clorofila *a* e composición de especies fitoplanctónicas).

Claramente, a evolución anual do afloramento costeiro vén determinada, en parte, polas condicións do inverno. Ao igual que acontece nos ecosistemas terrestres, a época invernal pauta un reinicio do ciclo anual. Ora ben, como quedou de manifesto co traballo de Álvarez-Salgado *et al.* (2003), é xusto no inverno cando a dispoñibilidade de observacións é extremadamente limitada; xa que logo, son moi valiosas as poucas existentes.

Este é o caso das observacións recollidas durante a campaña GALICIA VII, na que, a bordo do B/O García del Cid, levantaron áncoras desde Vigo o 18 de febreiro de 1984 o Dr. Fernando Fraga e o seu equipo, formado por Aida Fernández Ríos, Carmen Mouriño e Fiz Fernández, aos que tamén acompañaban Cèlia Marrasé, do Instituto de Investigaciones Pesqueras de Barcelona, e mais Manuel Silva Baloira e Victoriano Valencia Santana, do AZTI (Bilbao). O obxectivo desta campaña era precisamente poder determinar a profundidade das capas de mestura no momento de formación das masas de auga centrais. Por esta razón, levouse a cabo durante febreiro, mes de máximo arrefriamento da auga superficial. A idea era saber o gradiente latitudinal da profundidade das capas de mestura desde os 40° N ata os 47° N.

E o tempo acompañou… tanto que a expedición oceanográfica sufriu fortes ventos e ondadas que forzaron a interrupción da campaña. En dúas ocasións tiveron que regresar ao porto, como se pode comprobar no itinerario da campaña (Fraga *et al.* 1985, figura 3).

Aquela campaña supuxo un fito oceanográfico, pois, baixo condicións sumamente adversas e desafiando as ondadas, lograron ter observacións das masas de auga centrais no momento da súa formación (Pérez *et al.* 2005). Os resultados obtidos mostraron un aumento da profundidade da capa de mestura en dirección norte, que acadou no paralelo 47° N unha profundidade de 350 metros cunha auga totalmente homoxénea, fría e con altas concentracións de nutrientes inorgánicos. Cara ao sur, a profundidade da capa de mestura decrece ata os 150 metros no paralelo 40° N e existe un forte gradiente desta á altura do cabo Fisterra, no 43° N.

En latitudes subtropicais

Seguindo a pista da ENACW de orixe subtropical, lévase a cabo unha serie de estudos centrados no Atlántico nororiental subtropical, na rexión do arquipélago dos Azores (Pérez *et al.* 1998) e das illas Canarias (Pérez *et al.* 2001). A diferenza das costas galegas e portuguesas, nestas latitudes a recirculación do xiro subtropical —que alimenta a Corrente dos Azores e logo a Corrente das Canarias— imprime un marcado dinamismo que controla non só a circulación, senón tamén a distribución xeográfica e as características bioxeoquímicas das masas de auga presentes.

Trátase de realizar unha caracterización bioxeoquímica máis específica non só da ENACW, senón tamén das masas de auga localizadas a profundidades maiores. Baseándose nas distribucións de nutrientes inorgánicos, osíxeno e CID obtidas durante a campaña ANA (novembro de 1988) e empregando o modelo de mestura das masas de auga establecido anos antes para as costas de Galicia (Pérez *et al.* 1993), defínense uns valores tipo, ou característicos, para as distintas masas de augas no Atlántico nororiental subtropical.

A variación relativa das concentracións de nutrientes, osíxeno e CID amósanos que volumes das masas de auga experimentaron unha maior mineralización, é dicir, unha maior oxidación do seu contido de materia orgánica. É ao sur da Corrente dos Azores onde se atopan os volumes de ENACW con menores niveis relativos de osíxeno, máis nutrientes inorgánicos e maiores concentracións de CID. A análise tamén sinala a presenza de Auga Intermedia Antártica ao sur da Corrente dos Azores, caracterizada por baixas salinidades e altos contidos en nutrientes inorgánicos; os elevados niveis de silicato delatan que estes volumes de auga deben de proceder da afastada Antártida.

Arredor dunha década máis tarde, no marco do proxecto europeo CANIGO (Canary Islands Azores Gibraltar Observations), lévase a cabo unha serie de campañas oceanográficas que non só cobren a zona dos Azores, senón que tamén abranguen as illas Canarias. Interesa estudar tamén esta rexión para investigar e modelar a circulación das masas de auga que desempeñan un papel clave no afloramento do noroeste de África. Aida Fernández Ríos embarcarase en varias destas campañas, durante os veráns de 1998 e 1999, a bordo do buque oceanográfico Hespérides. De novo, atopámonos ante unha rexión moi marcada a nivel hidrodinámico pola presenza da Corrente das Canarias, que é como

se chama aquí a recirculación do xiro subtropical. Nesta campaña non só se avanza cara ao Trópico de Cáncer, senón que tamén se logra tomar mostras de augas máis profundas con relación ás da campaña ANA de 1988. A análise das masas de auga corroborará, ademais, a extensión cara ao norte da Auga Intermedia Antártica, que viaxa tan ao norte como o 28,5° N en forma de corrente de noiro ao longo do noroeste de África (Pérez *et al.* 2001).

No verán de 1998 é cando se leva a cabo unha radiografía máis detallada da circulación de mesoescala na zona da Corrente dos Azores (Pérez *et al.* 2003). Esta vez, ademais dos perfís de CTD, e logo de recoller mostras ao longo de toda a columna de auga para determinar as variables bioxeoquímicas, faise un detallado mapeamento de correntes baseándose nos rexistros obtidos por un ADCP. Isto permitirá describir en detalle o campo de velocidades e revelará como a Corrente dos Azores, trazando varios pequenos remuíños e meandros, imprime o seu camiño cara ao suroeste, co que determina non só o campo termohalino, senón tamén a distribución do fitoplancto cuantificado en función das medicións de clorofila.

Rumbo ao sur

A estreita colaboración cos investigadores Laurent Mémery, do Laboratoire de Physique des Océans do Institut français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER), en Brest, e o doutor Michel Arhan, do Laboratoire d'Océanographie dynamique et de Climatologie do Institut Pierre-Simon Laplace, en París, levou a que en 1994 un equipo con catro integrantes do grupo de Oceanografía, liderados por Aida Fernández Ríos, participásemos na campaña CITHER-2 do proxecto francés CITHER (Circulation thermohaline).

Aquel foi un fin de ano distinto. Eran os últimos días de 1993 e en Montevideo non había nin uvas nin un frío que esfola. No seu lugar, baixo unha calor de xustiza, a poboación montevideana dedicábase a tirar, literalmente, «o ano» polas xanelas. As rúas da capital suramericana estaban cheas de follas de almanaques por todas as esquinas. Poucos días despois, o 4 de xaneiro de 1994, desde o porto de Montevideo e a bordo do buque oceanográfico Maurice Ewing, emprenderiamos a marea máis longa da nosa vida.

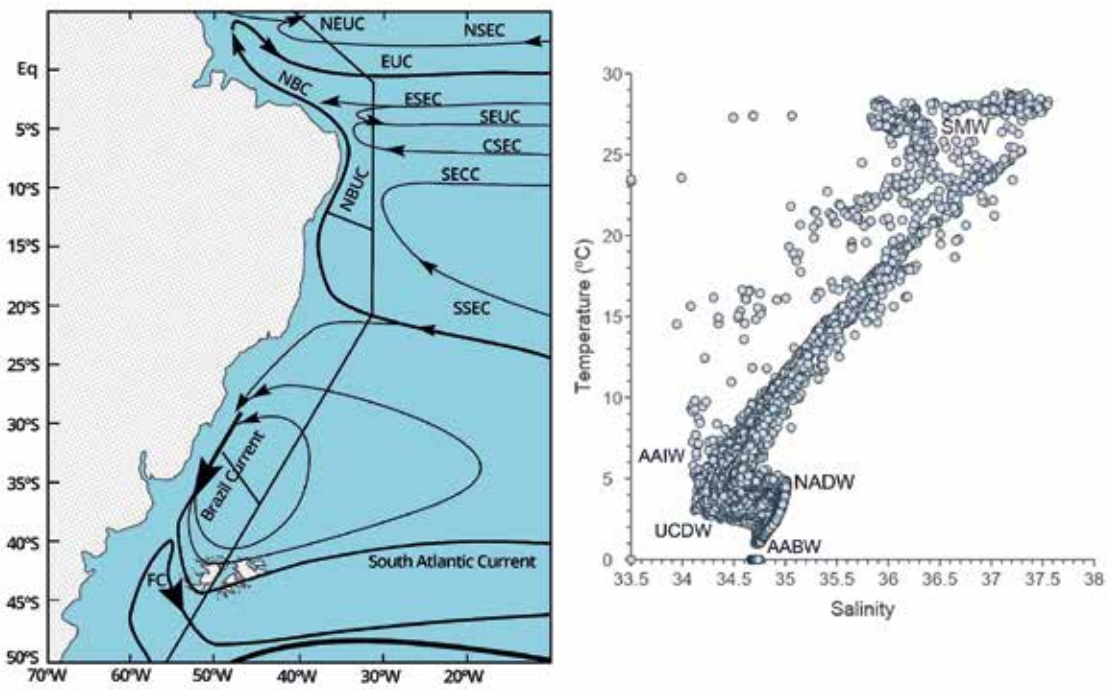


Figura 4. Ruta da expedición CITHER-2 entre xaneiro e marzo de 1994, superposta á representación esquemática da circulación superficial no Atlántico suroccidental. Os diagramas T-S das estacións A17 amosan as principais masas de auga do Atlántico Sur occidental. Neles indicáronse a auga de máxima salinidade superficial (SMW), a auga intermedia antártica (AAIW), a auga circumpolar superior (UCDW), a auga profunda do Atlántico Norte (NADW) e a auga de fondo antártica (AABW) (adaptado de Mémery *et al*. 2000)

O obxectivo era cubrir a sección A17 do WOCE (World Ocean Circulation Experiment), desde 51° S ata 10° N (figura 4), co fin de estudar todas as masas de auga ao longo do bordo occidental do Atlántico Sur e ecuatorial. Nun total de 116 estacións, separadas por aproximadamente trinta millas náuticas, recolléronse mostras de auga en 32 profundidades da columna de auga en cada estación.

A incrible resolución espacial desta sección WOCE A17 permitía resolver a complexa distribución das masas de auga. Os diagramas T-S poñen de manifesto a complexidade da distribución das

masas de auga que responden aos distintos réximes oceanográficos. Naquela expedición percorréronse desde as augas superficiais antárticas ao sur do 49° S, con paso polo réxime subtropical, ata chegar á dinámica subecuatorial (figura 4).

Nos niveis superiores da columna de auga, atopamos diferentes tipos de augas modais: desde a auga modal subantártica (SAMW, Subantarctic Mode Water) á auga modal subtropical (STMW, Subtropical Mode Water), entre os 37° S e os 29° S, para chegar ao dominio da auga modal de máxima salinidade (SMW, Salinity Maximum Water), entre os 12° S e os 12° N. As capas máis profundas son o dominio das augas procedentes do océano Austral. Así, distinguimos a auga intermedia antártica (AAIW, Antartic Intermediate Water), a auga circumpolar superior (UCDW, Upper Circumpolar Deep Water) e a auga de fondo antártica (AABW, Antartic Bottom Water). Ora ben, entre a UCDW e a AABW distínguese de forma clara, polas súas características termohalinas e bioxeoquímicas, o avance cara ao sur da auga profunda do Atlántico Norte (NADW, North Atlantic Deep Water).

Desde un punto de vista hidrodinámico, a expedición mostrou que a circulación nos niveis superior e intermedio do Atlántico Sur se caracteriza por varias recirculacións que están conectadas co bordo occidental, e é aí onde as augas que se dirixen cara ao Atlántico Norte acaban sendo transportadas pola corrente subsuperficial do norte do Brasil. Nas capas profundas, a circulación é máis meridional, «guiada» en gran medida polo bordo occidental. Con todo, aquí tamén se evidencian algunhas circulacións cara ao leste, principalmente no dominio da auga profunda do Atlántico Norte.

A campaña CITHER-2 foi un esforzo ciclópeo que sen dúbida fortaleceu, pola cantidade de observacións e resultados científicos, o coñecemento da circulación xeral do océano global e que, sorprendentemente, vinte e dous anos despois non se volveu realizar.

Por fin a Antártida…

A mediados de xaneiro de 1996, Aida Fernández Ríos e o seu equipo embarcaban desde Punta Arenas cara ao continente xeado a bordo do buque oceanográfico Hespérides para realizar medicións

Integrantes da segunda parte da campaña FRUELA, en xaneiro de 1996, antes de embarcar en Punta Arenas. Aida Fernández Ríos está diante, a primeira pola esquerda

do sistema do CO_2 e análises de nutrientes inorgánicos. As súas investigacións estaban enmarcadas no proxecto FRUELA, financiado polo Programa Antártico Español. Este proxecto baseábase en dúas campañas oceanográficas no océano Austral, en concreto na parte occidental do mar de Bellingshausen e nos estreitos de Bransfield e Gerlache. As campañas realizadas desde comezos de decembro de 1995 ata inicios de febreiro de 1996 cubriron distintos períodos do verán austral.

O obxectivo do proxecto FRUELA era cuantificar as reservas de carbono e os fluxos entre os principais compoñentes da «bomba biolóxica» (Anadón *et al.* 2002). Para iso era necesario estudar a transferencia de carbono a través das distintas fronteiras do dominio peláxico, incluída a transferencia de CO_2 entre a atmosfera e o océano, así como a exportación de carbono particulado fóra da zona fótica, o fluxo vertical de carbono particulado en augas profundas e a acumulación de carbono nos sedimentos.

O marcado carácter multidisciplinario do proxecto permitiulle a Aida Fernández Ríos colaborar con persoal investigador de moi diferentes ámbitos das ciencias mariñas. As súas investigacións indicaron que, malia que en termos xerais esta parte do océano Austral se comporta como un sumidoiro de CO_2, existe unha alta variabilidade en función do dominio e do período de estudo (Álvarez *et al.* 2002). Así mesmo, os resultados mostraron que a actividade biolóxica —en concreto, a proliferación de fitoplancto— é o principal factor que controla os cambios no comportamento como sumidoiro de CO_2 entre os dous períodos en que se tomaron mostras. De feito, as máximas proliferacións de fitoplancto atopáronse asociadas ás zonas frontais nos distintos dominios (García *et al.* 2002, Castro *et al.* 2002). Así, na parte occidental do mar de Bellingshausen identificouse o límite sur da Corrente Circumpolar Antártica, caracterizado por un forte gradiente na concentración de silicato, claramente inferior á do norte da fronte. Pola súa banda, no estreito de Bransfield estudouse a chamada fronte de Bransfield entre as augas procedentes do mar de Bellingshausen e as do mar do Weddell (García *et al.* 2002). É precisamente nestas zonas frontais onde, asociado ás máximas proliferacións de fitoplancto, se produce un consumo moi significativo de nutrientes inorgánicos (Castro *et al.* 2002). Estas investigacións reforzaron a idea do océano Austral como un mosaico de subsistemas no que as zonas frontais desempeñan un papel crítico na produción primaria a escala planetaria.

Ao longo da súa carreira científica, Aida Fernández Ríos estableceu numerosas colaboracións que levan a que vostedes poidan ler estas liñas compartidas entre nós as dúas. Alicia quería engadir á descrición de Aida o seu positivismo e mais a súa dispoñibilidade para axudar e empurrar. Compartimos varias campañas: a 24 norte do WOCE no Hespérides e unha VACLAN 2005 no Thalassa. Tras a campaña 24N do WOCE, formamos un grupo no que tamén compartimos proxectos estatais e europeos, reunións, grupos de traballo, comités científicos, teses de doutoramento e ata tribunais de

oposición. Foi unha gran compañeira, tanto na parte científica como na parte humana. Pasou a ser o meu referente cando se converteu en directora do Instituto de Ciencias Mariñas; contábame as súas experiencias e como o xestionaba. Aí xurdiu a miña idea de presentarme á dirección do Centro Oceanográfico de Santander do Instituto Español de Oceanografía, cargo que desempeñei durante oito anos, ata a miña xubilación. Aida foi unha gran científica e unha gran persoa.

Desde Vigo ata a Antártida, cruzando os trópicos e o ecuador, a mente inqueda de Aida, a súa constante dedicación, o seu traballo escrupuloso e detallista, a súa curiosidade oceanográfica e un entusiasmo contaxioso permitiron avanzar e adentrármonos no coñecemento destas masas de auga do Atlántico que comparten con ela o seu espírito viaxeiro.

Referencias bibliográficas

Álvarez M., Pérez F.F., Bryden H., Ríos A.F. (2004). Physical and biogeochemical transports structure in the North Atlantic subpolar gyre. Journal of Geophysical Research (Oceans), 109 (3), C030271-21.

Álvarez M., Ríos A.F., Rosón G. (2002). Spatio-temporal variability of air-sea fluxes of carbon dioxide and oxygen in the Bransfield and Gerlache Straits during Austral summer 1995-96. Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 49 (4-5), 643-662.

Álvarez-Salgado X.A., Figueiras F.G., Pérez F.F., Groom S., Nogueira E., Borges A.V., et al. (2003). The Portugal coastal counter current off NW Spain: New insights on its biogeochemical variability. Progress in Oceanography, 56 (2), 281-321.

Anadón R., Estrada M. (2002). The FRUELA cruises. A carbon flux study in productive areas of the Antarctic Peninsula (December 1995-February 1996). Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 49 (4-5), 567-583.

Castro C.G., Pérez F.F., Álvarez-Salgado X.A., Rosón G., Ríos A.F. (1994). Hydrographic conditions associated with the relaxation of an upwelling event off the Galician coast (NW Spain). Journal of Geophysical Research, 99 (C3), 5135-5147.

Castro C.G., Pérez F.F., Holley S.E., Ríos A.F. (1998). Chemical characterisation and modelling of water masses in the Northeast Atlantic. Progress in Oceanography, 41 (3), 249-279.

Castro C.G., Ríos A.F., Doval M.D., Pérez F.F. (2002). Nutrient utilisation and chlorophyll distribution in the Atlantic sector of the Southern Ocean during Austral summer 1995-96. Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 49 (4-5), 623-641.

De la Paz M., García-Ibáñez M.I., Steinfeldt R., Ríos A.F., Pérez F.F. (2017). Ventilation versus biology: what is the controlling mechanism of nitrous oxide distribution in the North Atlantic? Global Biogeochemical Cycles, 31 (4), 745-760.

Fraga F. (1981). Upwelling off the Galician Coast, Northwest-Spain. En: Coastal Upwelling. Washington D.C. American Geophysical Union, 176-182.

Fraga F., Mouriño C., Pérez F.F., Ríos A.F., Marrasé C. (1985). Campaña «GALICIA VII». Datos básicos. Instituto de Investigaciones Pesqueras. http://hdl.handle.net/10261/86744

García M.A., Castro C.G., Ríos A.F., Doval M.D., Rosón G., Gomis D., et al. (2002). Water masses and distribution of physico-chemical properties in the Western Bransfield Strait and Gerlache Strait during Austral summer 1995/96. Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 49 (4-5), 585-602.

García-Ibáñez M.I., Pérez F.F., Lherminier P., Zunino P., Mercier H., Tréguer P. (2018). Water mass distributions and transports for the 2014 GEOVIDE cruise in the North Atlantic. Biogeosciences, 15 (7), 2075-2090.

Manríquez M., Fraga F., Massol R. (1976). Datos hidrográficos de las costas del NW de España «Campaña Galicia I». Resultados de Expediciones Científicas, B/O Cornide, 5, 1-18.

Mémery L., Arhan M., Álvarez-Salgado X.A., Messias M.J., Mercier H., Castro C.G., et al. (2000). The water masses along the western boundary of the south and equatorial Atlantic. Progress in Oceanography, 47 (1), 69-98.

Mouriño C. (1983). Determinación de nitratos en agua de mar. Memoria de licenciatura de Ciencias Químicas. Universidade de Santiago de Compostela. 109 pp.

Mouriño C., Fraga F. (1985). Determinación de nitratos en agua de mar. Investigación Pesquera, 49, 81-96.

Pérez F.F., Castro C.G., Álvarez-Salgado X.A., Ríos A.F. (2001). Coupling between the Iberian basin -- Scale circulation and the Portugal boundary current system: A chemical study. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 48 (6), 1519-1533.

Pérez F.F., Castro C.G., Ríos A.F., Fraga F. (2005). Chemical properties of the deep winter mixed layer in the Northeast Atlantic (40-47ºN). Journal of Marine Systems, 54 (1-4), 115-125.

Pérez F.F., Gilcoto M., Ríos A.F. (2003). Large and mesoscale variability of the water masses and the deep chlorophyll maximum in the Azores Front. Journal of Geophysical Research (Oceans), 108 (7), 1-19.

Pérez F.F., Mintrop L., Llinás O., González-Dávila M., Castro C.G., Álvarez M., et al. (2001). Mixing analysis of nutrients, oxygen and inorganic carbon in the Canary Islands region. Journal of Marine Systems, 28 (3-4), 183-201.

Pérez F.F., Mouriño C., Fraga F., Ríos A.F. (1993). Displacement of water masses and remineralization rates off the Iberian Peninsula by nutrient anomalies. Journal of Marine Research, 51 (4), 869--892.

Pérez F.F., Pollard R.T., Read J.F., Valencia V., Cabanas J.M., Ríos A.F. (2000). Climatological coupling of the thermohaline decadal changes in Central Water of the Eastern North Atlantic. Scientia Marina, 64 (3), 347-353.

Pérez F.F., Ríos A.F., Castro C.G., Fraga F. (1998). Mixing analysis of nutrients, oxygen and dissolved inorganic carbon in the upper and middle North Atlantic Ocean east of the Azores. Journal of Marine Systems, 16, 219-233.

Pérez F.F., Ríos A.F., King B.A., Pollard R.T. (1995). Decadal changes of the θ-S relationship of the Eastern North Atlantic Central Water. Deep-Sea Research, 42 (11-12), 1849-1864.

Pollard R.T., Griffiths M.J., Cunningham S.A., Read J.F., Pérez F.F., Ríos A.F. (1996). Vivaldi 1991 -- A study of the formation, circulation and ventilation of Eastern North Atlantic Central Water. Progress in Oceanography, 37 (2), 167-172.

Ríos A.F., Pérez F.F., Fraga F. (1992). Water masses in the upper and middle North Atlantic Ocean east of the Azores. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 39 (3-4), 645-658.

Velo A., Vázquez-Rodríguez M., Padín X.A., Gilcoto M., Ríos A.F., Pérez F.F. (2010). A multiparametric method of interpolation using WOA05 applied to anthropogenic CO_2 in the atlantic. Scientia Marina, 74 (Suppl. 1), 21-32.

De GASPAR á rede global de observacións superficiais de CO_2 nos océanos

Xosé Antonio Padín Álvarez
Científico titular
CSIC - Instituto de Investigacións Mariñas

Introdución

Entre a prolífica actividade científica de Aida Fernández Ríos destaca, de maneira especial, a súa contribución ao estudo do papel do océano no ciclo global do carbono. A finais do século xx, a oceanografía química enfrontábase a cuestións emerxentes e de gran relevancia científica, impulsadas polas evidencias dos profundos cambios que se estaban a producir nos océanos como consecuencia da crecente influencia das actividades humanas sobre o sistema terrestre.

Estas preguntas eran —e continúan sendo— fundamentais porque o océano desempeña un papel decisivo como regulador do clima do planeta. Desde o inicio da Revolución Industrial, as actividades humanas emitiron preto de 700 GtC (1 GtC = 10^9 toneladas de carbono) de dióxido de carbono (CO_2) antropoxénico como consecuencia da queima de combustibles fósiles, a produción de cemento e os cambios no uso do solo. Durante este período, o océano absorbeu entre o 20 % e o 30 % dese CO_2 antropoxénico, o que mitigou parcialmente o incremento da súa concentración na atmosfera. Segundo o último balance global do carbono publicado por Friedlingstein *et al*. (2026), as emisións antropoxénicas na actualidade sitúanse arredor das 11,2 GtC anuais, das cales o océano capta aproximadamente 3,2 GtC. Esta captación é o resultado do balance do intercambio gasoso entre as diferentes rexións oceánicas e a atmosfera, que debuxan un mosaico de zonas sumidoiro e zonas fonte de CO_2 como o amosado na figura 1.

Sen esta retirada de CO_2 da atmosfera por parte do océano, a concentración atmosférica de CO_2 sería aproximadamente 80 partes por millón (ppm) superior ao valor actual, situado arredor das 425 ppm. Isto significa que o CO_2 representa na actualidade apenas o 0,0425 % do volume da troposfera, a capa máis baixa da atmosfera. Debido ás emisións antropoxénicas e a pesar da absorción exercida polos océanos e, nunha magnitude similar, pola vexetación terrestre e polos solos, a baixa concentración de CO_2 na atmosfera continúa aumentando a un ritmo próximo ás 2 ppm (0,0002 %) anuais.

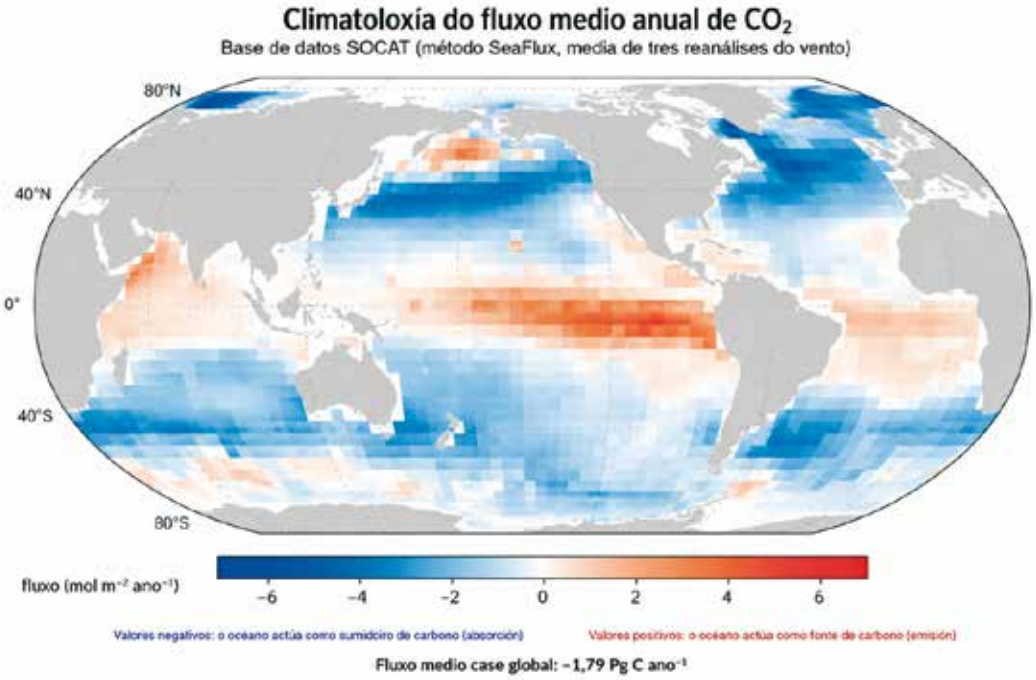


Figura 1. Adaptación gráfica da climatoloxía global dos fluxos aire-mar de CO_2 feita por Fay *et al.* (2024), construída a partir da base de datos SOCAT (www.socat.info)

A relevancia climática do CO_2 non reside tanto na súa abundancia relativa na atmosfera como nas propiedades radiativas. Esta molécula ten a capacidade de absorber e emitir radiación infravermella, o que lle permite reter parte da calor que a Terra emite cara ao espazo e influír de maneira decisiva no balance enerxético do planeta. Este mecanismo, coñecido como efecto invernadoiro, é un proceso natural esencial para a vida, xa que permite manter unha temperatura media global próxima aos 15 °C, moi superior aos aproximadamente −18 °C que lle corresponderían á Terra en ausencia deste fenómeno.

Aínda que o vapor de auga é o principal contribuínte ao efecto invernadoiro natural, o CO_2, que representa arredor do 20 % deste efecto, é o principal responsable do incremento do forzamento radiativo asociado ás actividades humanas. De feito, estímase que achega o 70 % do efecto invernadoiro antropoxénico, fronte ao 20 % do metano (CH_4) e o 10 % do óxido nitroso (N_2O). Por iso, pequenas variacións na súa concentración atmosférica teñen consecuencias de enorme transcendencia a escala planetaria e constitúen unha das evidencias máis claras do cambio climático actual.

Neste contexto, a absorción por parte dos océanos dunha fracción substancial das emisións antropoxénicas de CO_2 contribúe a reducir a intensidade do efecto invernadoiro e a frear o ritmo do quecemento global, que sería considerablemente maior se a totalidade destas emisións permanecese na atmosfera. Este servizo ecosistémico, esencial para mitigar o cambio climático e de incalculable valor para a humanidade, non está exento de custos para o propio medio mariño. A incorporación de CO_2 atmosférico á auga do mar altera a química desa auga ao modificar o equilibrio do sistema carbonato, o que provoca a diminución progresiva do pH e, por tanto, a acidificación oceánica. Este proceso tamén diminúe a concentración de ións carbonato, polo que limita a capacidade de numerosos organismos mariños (moluscos, corais, cocolitóforos, foraminíferos, pterópodos…) para formar cunchas e outras estruturas calcarias (para máis información, véxase o capítulo «A acidificación do océano: observar e comprender o cambio»).

A evolución futura da capacidade dos océanos para actuar como sumidoiro de carbono ou o impacto dos cambios ambientais sobre os procesos que regulan a captación, o almacenamento e a distribución do CO_2 antropoxénico, así como a transformación bioxeoquímica das masas de auga, constitúen algúns dos grandes desafíos da oceanografía do século XXI. Aida Fernández Ríos, desde o Instituto de Investigacións Mariñas (IIM) de Vigo, contribuíu de maneira decisiva ao avance deste campo de coñecemento ao abordar estas cuestións desde diferentes escalas de estudo e aproximacións metodolóxicas. Grazas á súa visión, ao seu entusiasmo e á súa capacidade de traballo, deixou unha pegada duradeira no coñecemento de procesos que conectan o océano co sistema climático terrestre. Tamén axudou a construír as infraestruturas, metodoloxías e redes de colaboración que aínda hoxe sustentan unha parte esencial da investigación sobre o ciclo do carbono oceánico. O seu esforzo potenciou o desenvolvemento das ferramentas que permiten á comunidade

científica determinar hoxe o papel do océano como sumidoiro de CO_2 e coas que mellorar a nosa capacidade para anticipar a resposta dos nosos mares aos desafíos do cambio global.

Discretas e indirectas medicións do intercambio de CO_2 entre o océano e a atmosfera

O estudo do intercambio de CO_2 entre o océano e a atmosfera constituíu unha das liñas centrais da actividade investigadora de Aida Fernández Ríos. Os seus primeiros traballos neste ámbito desenvolvéronse durante a década de 1990, nun momento especialmente estimulante para a oceanografía internacional. Naqueles anos, o coñecemento dos fluxos de carbono entre o océano e a atmosfera era aínda fragmentario e a comunidade científica comezaba a desenvolver varios dos maiores programas internacionais destinados a comprender o papel do océano no sistema climático global, entre os que destacaban o WOCE (World Ocean Circulation Experiment) e o JGOFS (Joint Global Ocean Flux Study). O WOCE naceu co obxectivo de obter observacións oceánicas de alta calidade que permitisen caracterizar o estado dos océanos durante a década de 1990 e ser a base analítica para mellorar os modelos de circulación e clima global. Pola súa banda, o JGOFS centrouse no estudo do intercambio de CO_2 entre a atmosfera e o océano e nos procesos biolóxicos e bioxeoquímicos responsables da súa transformación e do seu almacenamento no interior oceánico. O legado destes programas continúa plenamente vixente na actualidade. As seccións hidrográficas transoceánicas deseñadas no marco do WOCE seguen a repetirse de maneira regular a través do programa GO-SHIP (Global Ocean Ship-based Hydrographic Investigations Program), que proporciona unha das series de observacións máis valiosas para avaliar os cambios a longo prazo no océano. Do mesmo xeito, as estacións de referencia establecidas polo JGOFS, como o BATS (Bermuda Atlantic Time-series Study) no Atlántico Norte e o HOT (Hawaii Ocean Time-series) no Pacífico Norte, continúan achegando información fundamental sobre a evolución dos ecosistemas mariños e do ciclo global do carbono.

Foi neste escenario de expansión dunha oceanografía moderna no que Aida Fernández Ríos iniciou a súa traxectoria científica internacional. Participou na sección A17 do WOCE, unha das grandes seccións hidrográficas do Atlántico que conectaba as augas subantárticas próximas ás illas Malvinas co Atlántico tropical occidental ás portas do mar Caribe. Tamén tomou parte da campaña polar española

FRUELA, que foi parte da contribución española ao JGOFS. Estas experiencias situárona a bordo deses históricos esforzos internacionais destinados a revelar a circulación global dos océanos e ofrecer unha visión integral dos fluxos de carbono entre a atmosfera, o océano e a biosfera mariña.

Antes da súa participación nestes grandes programas internacionais de investigación oceanográfica, Aida Fernández Ríos xa acumulaba unha notable experiencia en campañas tanto costeiras como oceánicas. Na década dos 80, destacan as campañas GALICIA I, II e IV, realizadas a bordo do buque oceanográfico Cornide de Saavedra, e posteriormente as campañas GALICIA entre GALICIA V e IX, desenvolvidas no García del Cid. O seu obxectivo principal era cuantificar a relación entre a dinámica das masas de auga, o seu contido en carbono inorgánico disolto e a produtividade das augas que rodean a Península Ibérica. Co inicio da década de 1990, e impulsadas polo financiamento da Unión Europea, estas liñas de traballo evolucionaron cara ao estudo do intercambio de CO_2 entre o océano e a atmosfera, co que contribuíron a consolidar o estudo do ciclo global do carbono oceánico como unha das prioridades da investigación climática. Neste contexto desenvolvéronse as campañas MORENA, realizadas na primavera e no outono de 1993 e mais no verán de 1994 entre os 40° N e os 43° N, desde a costa galega, ata os 11° W. Estas campañas deron lugar ao primeiro traballo científico do IIM que incorporou estimacións dos fluxos de CO_2 entre o océano e a atmosfera e sentaron as bases dun dos principais eixes da actividade investigadora de Aida Fernández Ríos.

Esta investigación baseada na análise de mostras discretas de auga do mar seguía o deseño clásico doutros estudos pioneiros da época para caracterizar o papel do océano como sumidoiro ou fonte de CO_2. A partir das medicións de pH e alcalinidade total e información complementaria de temperatura, salinidade e nutrientes, estimábase a presión parcial de CO_2 na superficie mariña mediante as constantes de equilibrio do sistema carbonato. Estas constantes describen a distribución do carbono inorgánico disolto entre as súas principais especies químicas: CO_2 disolto, ácido carbónico (H_2CO_3), ión bicarbonato (HCO_3^-) e ión carbonato (CO_3^{2-}), e permiten resolver o conxunto de ecuacións que rexen o equilibrio químico do sistema carbonato na auga do mar. En vez de utilizar as concentracións destas moléculas e ións, a comunidade oceanográfica define este equilibrio mediante catro variables fundamentais da oceanografía química: pH, alcalinidade total, carbono inorgánico disolto (C_T) e presión parcial de CO_2 (pCO_2). Entre elas, a pCO_2 é a variable fundamental

para estimar os fluxos aire-mar, xa que a comparación entre os seus valores na auga superficial e na atmosfera indica se o océano actúa como sumidoiro ou fonte de CO_2 atmosférico. Dado que estas catro variables están relacionadas a escala termodinámica, a determinación analítica de dúas delas permite calcular as outras dúas e caracterizar con precisión o estado do sistema do carbono mariño. Este procedemento esixía unha elevada exactitude analítica, xa que as incertezas nas medicións iniciais se propagaban aos cálculos termodinámicos empregados para estimar as restantes variables. A fiabilidade dos resultados dependía, por tanto, da precisión das determinacións de pH e alcalinidade, un ámbito en que o IIM se consolidou como un referente internacional grazas ao desenvolvemento de metodoloxías potenciométricas robustas, sensibles e altamente reproducibles para a análise da auga do mar.

Os resultados daquelas campañas na marxe ibérica do Atlántico Norte amosaron unhas augas oceánicas que alternaban o seu papel como sumidoiro ou fonte de CO_2 atmosférico en función da estación do ano e das condicións hidrográficas dominantes. O estudo evidenciou a capacidade da actividade fotosintética para reducir as concentracións superficiais de CO_2 por debaixo do equilibrio coa atmosfera durante os períodos de estabilidade da columna de auga. Porén, durante os episodios de afloramento costeiro característicos do verán, a relación entre a pCO_2 superficial e a concentración de clorofila foi positiva. Este resultado puxo de manifesto que a entrada de augas profundas ricas en nutrientes estimulaba a produción biolóxica ao tempo que achegaba cantidades elevadas de carbono inorgánico disolto á superficie. A actividade fotosintética asociada ao afloramento conseguía amortecer de maneira parcial o incremento de CO_2 na superficie, aínda que non evitaba que estas augas actuasen como fonte neta de CO_2 cara á atmosfera. O traballo destacou así o papel fundamental do acoplamento físico-biolóxico no control do ciclo do carbono nos sistemas de afloramento. Finalmente, a absorción media de CO_2 atmosférico estimada para esta rexión resultou inferior á observada nas augas circundantes do Atlántico Norte, debido á influencia dos procesos de afloramento costeiro que caracterizan a dinámica bioxeoquímica do noroeste da Península Ibérica.

Unha metodoloxía semellante foi empregada tamén para analizar a distribución dos fluxos de CO_2 entre o océano e a atmosfera e mais os factores que controlan a súa variabilidade no océano Antártico durante o verán austral de 1995-1996. Esta rexión desempeña un papel fundamental no

ciclo global do carbono, xa que se trata dun dos principais sumidoiros de CO_2 antropoxénico do planeta. A combinación dunha elevada produtividade fitoplanctónica e da formación de masas de auga profundas favorece a absorción de CO_2 atmosférico e o seu transporte cara ao océano interior, onde pode permanecer secuestrado durante décadas ou mesmo séculos. A devandita campaña oceanográfica recibiu o nome de FRUELA en homenaxe a un dos reis de Asturias no século VIII, reflexo do liderado da Universidad de Oviedo nun proxecto que supuxo unha das primeiras contribucións españolas ao programa internacional JGOFS. O seu principal obxectivo era cuantificar os fluxos de carbono nunha das rexións máis produtivas e dinámicas do océano Austral, en concreto nas augas do mar de Bellingshausen e nos estreitos de Gerlache e Bransfield, situados ao oeste da Península Antártica. Nesta expedición, Aida Fernández Ríos participou, xunto con máis persoal investigador do IIM, nas medicións de pH e de alcalinidade total, fundamentais para a caracterización do sistema carbonato nunha contorna tan singular e remota. Paga a pena recordar que España se atopaba daquela nos primeiros anos da súa actividade científica antártica. Apenas seis anos despois da inauguración da Base Antártica Xoán Carlos I e durante a terceira campaña polar do buque oceanográfico Hespérides, os datos recollidos nesas augas remotas e tan singulares revelaron que a distribución da pCO_2 superficial estaba moi condicionada polas características hidrográficas locais e pola interacción entre procesos físicos e biolóxicos nun medio extraordinariamente dinámico.

Un dos resultados máis relevantes do estudo foi comprobar que non existe un único mecanismo dominante que controle a pCO_2 superficial. Pola contra, a súa variabilidade depende das condicións hidrográficas locais e da intensidade dos procesos biolóxicos. O desenvolvemento de floracións fitoplanctónicas emerxeu como o principal factor de control nalgunhas zonas, pois reducía a pCO_2 superficial ata valores próximos ás 200 microatmosferas (µatm), sobre un 55 % da concentración atmosférica observada daquela (358 µatm). Esta forte subsaturación favorecía un intenso fluxo de CO_2 desde a atmosfera cara ao océano.

Os resultados tamén puxeron de manifesto a importancia dos procesos que operan a escalas espaciais e temporais moi reducidas. Nas áreas máis abertas ou con menor produtividade biolóxica, o efecto do quecemento estival das augas adquiría unha maior relevancia e a temperatura

convertíase no principal factor regulador da pCO_2. Pola contra, nas zonas afectadas por intensas floracións fitoplanctónicas, a actividade biolóxica dominaba con claridade o control do sistema carbonato.

Este traballo contribuíu a revelar parte da complexidade dos mecanismos que regulan os fluxos de CO_2 entre o océano e a atmosfera nunha das rexións máis relevantes do sistema climático terrestre. O océano Antártico presenta unha elevada sensibilidade ao cambio climático, xa que procesos como o quecemento das augas, as variacións na extensión do xeo mariño, a intensificación dos ventos ou os cambios na estratificación da columna de auga poden afectar de maneira significativa á captación de CO_2. Este feito, xunto coa escaseza histórica de observacións, sobre todo baixo condicións ambientais extremas, converte esta rexión nunha das principais fontes de incerteza nos balances globais de carbono. Por este motivo, as medicións de pCO_2 resultan especialmente valiosas, xa que permiten mellorar as estimacións da capacidade do océano Antártico para actuar como sumidoiro de carbono e avaliar a súa resposta fronte ao cambio climático.

Directas e continuas medicións de pCO_2 na auga do mar

Os sistemas de medición directa da pCO_2 na auga do mar presentan importantes vantaxes fronte á súa estimación indirecta a partir doutros parámetros do sistema carbonato. En primeiro lugar, permiten determinar directamente a pCO_2 e evitar así as incertezas derivadas da selección das constantes termodinámicas empregadas nos cálculos e da propagación dos erros analíticos asociados ás medicións de pH, alcalinidade total ou carbono inorgánico disolto. En segundo lugar, proporcionan unha resolución temporal e espacial moi superior ás técnicas baseadas en mostraxes discretas, ao posibilitar a adquisición de datos en continuo cunha frecuencia que xera miles de observacións diarias.

Esta elevada frecuencia de mostraxe permite caracterizar a variabilidade espacial do CO_2 a escalas de mesoescala e submesoescala, ao identificar estruturas como frontes oceánicas, filamentos de afloramento, plumas fluviais, zonas de converxencia ou floracións fitoplanctónicas, que a miúdo permanecen ocultas en campañas baseadas exclusivamente en observacións discretas. Ademais,

dado que a diferenza de pCO_2 entre a superficie do océano e a atmosfera constitúe o principal forzamento termodinámico que regula os intercambios de CO_2 entre ambos os compartimentos, a súa medición directa permite estimar os fluxos aire-mar con maior robustez e menor incerteza.

A partir da segunda metade do século xx comezaron a desenvolverse sistemas capaces de medir de forma directa a presión parcial de CO_2 da auga do mar, un avance que transformou en profundidade o estudo dos intercambios de carbono entre o océano e a atmosfera. Con todo, a orixe desta revolución instrumental sitúase a finais dos anos cincuenta, nun contexto científico que trouxo importantes avances na oceanografía das décadas seguintes. Un deses fitos produciuse en 1957, coincidindo co Ano Xeofísico Internacional, cando Roger Revelle e Hans Suess publicaron o seu traballo «Carbon Dioxide Exchange Between Atmosphere and Ocean and the Question of an Increase of Atmospheric CO_2 During the Past Decades». Neste estudo formularon unha idea que resultaría decisiva para o desenvolvemento posterior da oceanografía do carbono: a capacidade do océano para absorber o CO_2 emitido polas actividades humanas non é ilimitada, senón que está condicionada pola propia química do sistema carbonato. Cando o CO_2 atmosférico se disolve na auga do mar, reacciona formando ácido carbónico, que axiña se transforma en bicarbonato e ións hidróxeno (H^+), o que provoca unha diminución do pH. O sistema carbonato responde a esta perturbación consumindo parte dos ións carbonato (CO_3^{2-}) para formar máis bicarbonato (HCO_3^-). Como consecuencia, tamén aumenta de modo progresivo a fracción de carbono presente como CO_2 disolto. Isto provoca que, a medida que o océano absorbe máis CO_2, unha crecente fracción de CO_2 disolto non sexa capaz de disociarse noutras especies do sistema de carbonatos. Esta limitación da capacidade amortecedora do sistema carbonato coñécese hoxe como factor ou efecto Revelle e supón un dos conceptos fundamentais da oceanografía química moderna. No escenario actual, este efecto fai que un aumento relativamente pequeno do CO_2 disolto no océano provoque un incremento proporcionalmente maior da pCO_2 da auga superficial. Como consecuencia, redúcese progresivamente a diferenza de pCO_2 entre a atmosfera e o océano, co que diminúe a capacidade deste último para continuar absorbendo CO_2 da atmosfera.

Pola súa parte, o outro autor dese traballo, Hans Suess, realizou unha contribución igualmente transcendental para evidenciar a pegada das actividades humanas sobre o clima da Terra.

Nun estudo publicado en 1955, baseado na análise da composición isotópica do carbono, demostrou que a concentración atmosférica de radiocarbono (^{14}C) estaba a diminuír como consecuencia da incorporación masiva de CO_2 procedente da combustión de produtos fósiles. Este carbono, almacenado no subsolo durante millóns de anos en forma de carbón, petróleo ou gas natural, presenta un contido case nulo en ^{14}C debido á desintegración radioactiva deste isótopo, cuxa vida media é de 5730 anos. Como resultado, a emisión á atmosfera dese carbono «vello» alterou a relación isotópica natural do carbono atmosférico, o que proporcionou unha das primeiras evidencias directas da influencia humana sobre o ciclo global do carbono. Este fenómeno, identificado nun inicio a partir da análise da madeira de árbores centenarias, empregadas como rexistro pretérito da composición isotópica da atmosfera, pasou a coñecerse como efecto Suess. Anos máis tarde, o mesmo sinal isotópico foi detectado tamén no océano, o que confirmou que unha fracción significativa do CO_2 antropoxénico emitido á atmosfera estaba a ser absorbida polas augas superficiais e transportada de modo progresivo cara ao interior oceánico. Curiosamente, poucos anos despois da publicación destes traballos, a concentración atmosférica de ^{14}C experimentou un incremento abrupto e sen precedentes. A causa non foi unha alteración dos procesos naturais do ciclo do carbono, senón as numerosas probas nucleares atmosféricas realizadas durante as décadas de 1950 e 1960. Este sinal artificial de ^{14}C foi utilizado por oceanógrafos como un dos trazadores máis valiosos para estudar a ventilación, a circulación e as escalas temporais de renovación das masas de auga oceánicas.

Esta capacidade da humanidade para alterar a composición da atmosfera e, en consecuencia, influír directamente no clima terrestre levou a Revelle e Suess a incluíren naquel artigo unha frase contundente e visionaria: «A humanidade está a levar a cabo un experimento xeofísico a escala planetaria, dun tipo que non podería realizarse no pasado nin repetirse no futuro».

Os últimos anos da década de 1950 supuxeron un auténtico punto de inflexión na comprensión da influencia humana sobre o sistema terrestre. Ademais de establecérense as bases conceptuais da ciencia moderna do cambio climático, este período impulsou o desenvolvemento das metodoloxías e dos sistemas de observación necesarios para observar de forma continuada o CO_2 na atmosfera e no océano, co obxectivo de contrastar mediante experimentacións as hipóteses dos investigadores da época. Case de forma simultánea e froito da colaboración, Charles D.

Keeling e Taro Takahashi iniciaron as primeiras medicións directas de CO_2 na atmosfera e na superficie do océano, respectivamente. En 1958, Keeling puxo en marcha no Observatorio de Mauna Loa (Hawai) o primeiro programa de observación continua de CO_2 atmosférico de alta precisión. A serie temporal resultante, coñecida hoxe como curva de Keeling, continúa ampliándose máis de seis décadas despois e documenta o incremento sostido da concentración atmosférica de CO_2, constituíndo unha das evidencias máis robustas da influencia humana sobre o clima terrestre. De forma paralela e no océano Atlántico, Taro Takahashi, investigador do Lamont-Doherty Geological Observatory da Universidade de Columbia, levou a cabo as primeiras medicións directas de CO_2 en auga do mar. Estas iniciativas proporcionaron as bases da monitorización destinada a cuantificar o intercambio de CO_2 entre o océano e a atmosfera, así como a comprender o papel do océano como sumidoiro de carbono antropoxénico.

Nas décadas seguintes, o crecente interese por cuantificar o papel do océano como sumidoiro de CO_2 e a constatación de que a inmensidade do océano mundial facía imposible abordar este desafío desde iniciativas illadas impulsaron o desenvolvemento dunha ampla comunidade científica internacional. Numerosos laboratorios de Europa, América do Norte e Asia deseñaron e construíron os seus propios sistemas de medición continua de pCO_2. A finais da década de 1980, programas internacionais como o JGOFS contribuíron decisivamente a consolidar este esforzo colectivo, ao promover a coordinación entre grupos de investigación de todo o mundo. Grazas a esta colaboración, a medición de pCO_2 pasou de ser unha actividade limitada a un reducido número de laboratorios pioneiros a converterse nun compoñente esencial da observación oceánica. Neste contexto impulsáronse campañas oceanográficas globais, series temporais de longa duración, protocolos analíticos comúns e exercicios internacionais de intercalibración que permitiron harmonizar as observacións realizadas por distintos grupos e avanzar cara a unha visión global do ciclo oceánico do carbono.

GASPAR, o equipo de medición de pCO_2 do IIM-CSIC

O IIM tamén se sumou a este esforzo internacional e, a comezos da década de 1990, decidiu desenvolver o seu propio sistema analítico para a medición continua de pCO_2 (figura 2). Neste pro-

ceso, Aida Fernández Ríos desempeñou un papel fundamental ao impulsar a captación de financiamento e promover o establecemento de contactos con grupos internacionais que xa acumulaban unha ampla experiencia no desenvolvemento e operación deste tipo de instrumentación. A referencia tecnolóxica escollida foi o sistema desenvolvido no Institut für Meereskunde (IFM) de Kiel, en Alemaña, un dos laboratorios europeos líderes na observación do CO_2 oceánico. Aida comprendeu

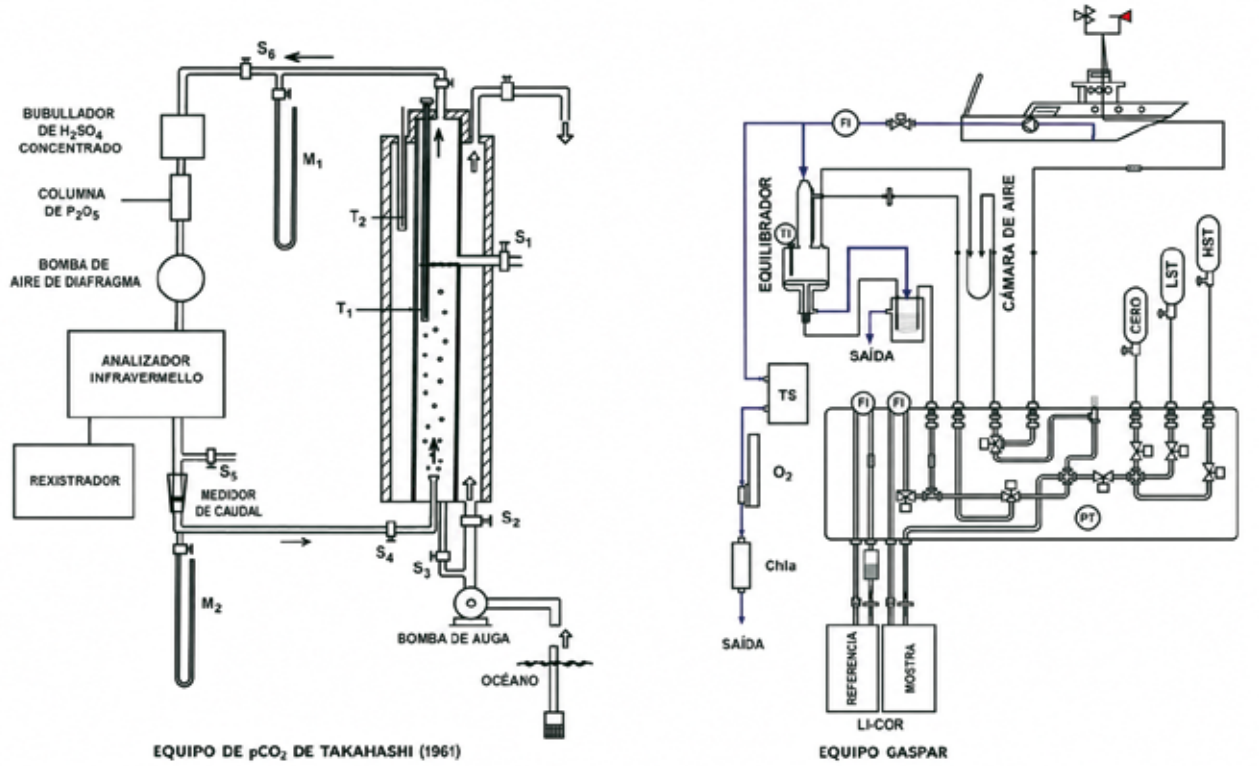


Figura 2. Á esquerda, adaptación gráfica do esquema do equipo de medición de pCO_2 publicado por Takahashi (1961); á dereita, esquema de GASPAR, o equipo de medición de pCO_2 do IIM

desde o inicio que un proxecto desta natureza, atendendo á realidade da época do IIM, só podía prosperar coa suma de experiencia e coñecemento científico e técnico. Por iso, a súa extraordinaria capacidade para establecer colaboracións e sumar esforzos arredor dun obxectivo común resultou determinante para transformar esta idea nun proxecto viable. O asesoramento do grupo alemán, no que destacaban investigadores como Ludger Mintrop e Arne Körtzinger, referentes internacionais na oceanografía do carbono e amigos persoais de Aida, resultou esencial para orientar o desenvolvemento do sistema. Na mesma medida, unha peza clave deste proceso foi a participación da Escola Universitaria de Enxeñaría Técnica Industrial da Universidade de Vigo, que fixo posible o deseño e a construción do equipo nos seus aspectos máis tecnolóxicos. Máis aló dunha simple colaboración estratéxica, esta iniciativa converteuse no proxecto de fin de carreira de Iago Rodicio, baixo a dirección de Miguel López e Ernestina Pérez, profesores na coñecida daquela como Escola de Peritos. A confluencia de coñecemento oceanográfico, capacidade técnica e entusiasmo persoal permitiu materializar o sistema de medición continua de pCO_2 desenvolvido no IIM.

Unha característica común a todos os sistemas de medición continua de pCO_2 desenvolvidos desde aqueles anos é que comparten un mesmo principio analítico: determinar a presión parcial de CO_2 nunha fase gasosa que se atopa en equilibrio coa auga do mar. En termos prácticos, o sistema fai circular unha corrente de aire a través dun equilibrador no que esta entra en contacto coa auga mariña e intercambia CO_2 con ela ata alcanzar o equilibrio termodinámico. Unha vez acadado este estado, a pCO_2 do aire reflicte fielmente a pCO_2 da auga do mar, o que permite a súa determinación precisa. Xusto esta idea de equilibrio entre as fases gasosa e líquida, coñecido como *gas parity* na súa expresión inglesa, foi o que inspirou a Aida á hora de bautizar o equipo co nome de GASPAR. O nome non só facía referencia ao concepto físico-químico que sostiña o funcionamento do sistema, senón que tamén lle confería unha identidade propia a un instrumento chamado a converterse nun compañeiro de traballo durante longas xornadas noutras tantas campañas oceanográficas.

Tal era a ilusión que Aida depositara neste novo colega que, no momento da súa posta en funcionamento, decidiu dedicarlle unhas palabras, baixo o título «Ha nacido GASPAR», que amosaban a mestura de entusiasmo científico e cariño coa que se parira aquel equipo:

Su nacimiento tuvo que ser por cesárea porque ya estaba fuera de cuentas y corría el riesgo de perderse algo importante.

Tiene un hermano mayor y unos primos en Alemania, Inglaterra y Noruega. Por sus venas de Tygon y arterias de acero inoxidable circulan fluidos bombeados por un corazón compuesto de tres bombas Fürgut que trabajan a 24 V. Una de ellas hace funcionar el sistema periférico de circuito cerrado y las otras dos, trabajando acopladamente, conforman sus ventrículos izquierdo y derecho, que hacen marchar el sistema principal comunicando su pulmón —también llamado equilibrador de gases— con su hígado, denominado Licor, que es un sistema de medida de gases por infrarrojos.

Al igual que su hermano, tiene una enfermedad congénita y necesita de respiración asistida. Una máquina Air-Cadet le proporciona bienestar y aire a presión atmosférica. Su cerebro es un Pentium de última generación con software 2000 Millennium Profesional. Sus tutores y sus padres han volcado en él sus conocimientos para que su comportamiento y órdenes cerebrales sean las adecuadas para una larga vida y buen funcionamiento. Gracias a este cerebro puede mover sus brazos y piernas —las válvulas de 2 y 3 vías—, que le dan movilidad para calibrarse y desplazarse a comprobar los niveles de presión parcial de dióxido de carbono que tiene la atmósfera y el agua de mar.

Nunca pierde el norte, un sistema GPS le proporciona las coordenadas necesarias para saber siempre en dónde se encuentra; y tiene muy claro su destino: medir presión parcial de dióxido de carbono en continuo tanto en el aire como en el agua de mar tras haber equilibrado sus fases líquida y gaseosa. Por eso le hemos puesto de nombre GASPAR.

Si no hubiese nacido a tiempo hubiera perdido un crucero a lo largo del Atlántico a bordo del Hespérides, hacia el que parte hoy. Allí, estoy convencida de que el aire libre le sentará bien y además se sentirá útil.

A verdade é que GASPAR se facía notar nos laboratorios e nos buques oceanográficos polos que pasaba. Máis que un simple instrumento, era unha auténtica instalación científica de carácter inequivocamente artesanal que reclamaba sempre un espazo propio. O seu equilibrador estaba construído en vidro, polo que deixaba á vista como a auga do mar circulaba no seu interior, e constaba de dúas cámaras: na inferior, unha corrente de aire ascendía en forma de finas burbullas a través dun prato poroso, mentres que na superior a auga do mar descendía formando unha fina película adherida ás paredes internas da

columna antes de regresar á cámara inferior. Esta configuración, baseada na combinación dun equilibrador de burbullas e de fluxo laminar, maximizaba a superficie de contacto entre as fases líquida e gasosa e favorecía o intercambio rápido e eficaz de CO_2 ata alcanzar o equilibrio químico. Unha vez completado este proceso, a auga era devolta ao mar, mentres que a corrente gasosa, impulsada por bombas de membrana, era conducida cara ao analizador para determinar a súa concentración de CO_2 e logo recirculaba de novo polo equilibrador para pechar así o circuíto de medición.

As fraccións molares de CO_2 e vapor de auga na corrente gasosa procedente do equilibrador determinábanse mediante un analizador infravermello non dispersivo (NDIR, Non-Dispersive Infrared Analyzer). No caso de GASPAR, empregábase un LI-COR LI-6262 CO_2/H_2O, un dos analizadores de referencia da época para este tipo de aplicacións. A súa elevada sensibilidade e, sobre todo, a súa notable estabilidade fronte ás vibracións, balances e aceleracións propias do traballo a bordo convertíano nun instrumento especialmente adecuado para campañas oceanográficas. O seu funcionamento baseábase na capacidade das moléculas de CO_2 e vapor de auga para absorber radiación infravermella en lonxitudes de onda específicas, a propiedade física que está na orixe do seu papel como gases de efecto invernadoiro. O analizador comparaba a intensidade da radiación emitida por unha fonte infravermella coa medición logo de atravesar a mostra gasosa. A magnitude da absorción permite determinar con gran precisión as concentracións destes compostos na corrente gasosa en equilibrio coa auga do mar. Para garantir a exactitude das medicións, o sistema calibrábase periodicamente mediante gases padrón con concentracións coñecidas de CO_2, para asegurar así a consistencia das observacións das diferentes campañas.

Ademais da pCO_2 da auga do mar, o sistema realizaba tamén medicións directas da concentración de CO_2 na atmosfera. Para iso, o aire exterior captábase mediante unha toma instalada nunha estrutura elevada situada na proa do buque para minimizar a posible contaminación procedente das emisións do propio barco. A intervalos regulares, unha bomba independente (Air-Cadet) impulsaba esta mostra de aire cara ao analizador, o que permitía determinar a concentración atmosférica de CO_2 e, por diferenza coa medición na auga do mar, estimar o gradiente océano-atmosfera que controla os intercambios de carbono entre ambos os compartimentos.

Todos os datos se rexistraban de forma automática xunto con información auxiliar, como a presión atmosférica, a temperatura do equilibrador, a posición GPS do buque e diversas variables ocea-

nográficas procedentes doutros sensores instalados. Este conxunto de observacións permitía calcular a pCO_2 da auga do mar en condicións de saturación de vapor de auga e corrixir a temperatura da superficie mariña, de acordo coas recomendacións, protocolos e formulacións adoptadas pola comunidade científica internacional. O resultado final era unha estimación robusta e comparable da pCO_2 superficial do océano, apta para o cálculo dos fluxos de CO_2 entre o océano e a atmosfera.

A acción conxunta destes equipos *feitos na casa* permitiu obter observacións continuas cunha resolución espacial sen precedentes, ao multiplicar enormemente as medicións dos fluxos de CO_2 entre o océano e a atmosfera. Grazas a estas novas capacidades, foi posible pasar de observacións puntuais e dispersas a unha visión máis global da distribución do CO_2 na superficie oceánica. Con todo, non foi ata 1997, case corenta anos despois das primeiras medicións en continuo de pCO_2 na auga do mar, cando Taro Takahashi conseguiu integrar moitas das observacións dispoñibles a escala global e publicou o primeiro mapa global dos fluxos de CO_2 entre o océano e a atmosfera.

Calculando os fluxos de CO_2 océano-atmosfera

A cuantificación do intercambio de CO_2 entre o océano e a atmosfera exprésase mediante a seguinte ecuación:

$$F = k\,S\,(pCO_2mar - pCO_2atm)$$

S é a solubilidade do CO_2 na auga do mar; k representa a velocidade de transferencia gasosa, e a diferenza de pCO_2 establece o gradiente na interface entre o océano e a atmosfera. As unidades habituais son molC m^{-2} ano^{-1} ou mmolC m^{-2} $día^{-1}$.

Indo ao detalle desta expresión, a solubilidade do CO_2 na auga do mar (S) depende fundamentalmente da temperatura e da salinidade da superficie oceánica e está ben descrita pola formulación proposta por Weiss (1974). Ambos os parámetros exercen un efecto inverso sobre a solubilidade: a medida que aumenta a temperatura ou a salinidade, diminúe a capacidade da auga para disolver CO_2. Por este motivo, as augas frías e pouco salgadas poden almacenar máis dióxido de carbono que as augas cálidas e salinas.

O gradiente de CO_2, expresado habitualmente como a diferenza de pCO_2 ou fugacidade entre a atmosfera e a superficie do océano, constitúe o principal forzamento termodinámico que impulsa o intercambio de carbono entre ambos os compartimentos. Cando a pCO_2 da auga do mar é inferior á atmosférica, o océano actúa como sumidoiro e absorbe CO_2; pola contra, cando a pCO_2 superficial supera a da atmosfera, o océano convértese nunha fonte e libera carbono cara ao aire. A diferenza do que ocorre no océano, a concentración atmosférica de CO_2 presenta unha distribución relativamente homoxénea a escala planetaria debido á rápida mestura da atmosfera, que se sitúa nun ou dous anos. Como consecuencia, case todo o planeta, mesmo as rexións máis remotas, mostra unha semellante tendencia interanual da concentración de CO_2.

A pCO_2 da auga do mar caracterízase por unha extraordinaria variabilidade espacial e temporal que opera de curtas a longas escalas. Esta variabilidade é consecuencia da interacción de múltiples procesos físicos, químicos e biolóxicos que controlan o sistema carbonato. O valor da pCO_2 da superficie mariña depende fundamentalmente da temperatura, da salinidade, da mestura vertical, da fotosíntese, da respiración e remineralización da materia orgánica, e da formación e disolución de carbonato cálcico. A estes procesos engádense outros mecanismos de transporte, como a circulación oceánica, a formación e ventilación de masas de auga, os remuíños, as frontes oceánicas, o afloramento ou as plumas fluviais, capaces de xerar fortes gradientes de CO_2 en distancias relativamente curtas.

Volvendo á expresión utilizada para estimar os fluxos de CO_2 océano-atmosfera, k representa a velocidade de transferencia gasosa e constitúe o denominado forzamento cinético do sistema. Este parámetro depende da hidrodinámica e da turbulencia na interface aire-mar, así como dos procesos de difusión molecular e turbulenta que teñen lugar na capa límite en que se produce o intercambio. A maioría das parametrizacións relacionan k coa velocidade do vento a dez metros mediante expresións cadráticas e, en menor medida, cúbicas, co obxectivo de representar o incremento non-lineal da transferencia gasosa asociado ao aumento da turbulencia superficial. En xeral, as relacións cadráticas son as que presentan un maior consenso e reproducen razoablemente ben os balances globais de ^{14}C, empregado como trazador da ventilación oceánica e para a calibración das parametrizacións da velocidade de intercambio gasoso entre a atmosfera e o océano.

Estes fluxos aire-mar de CO_2 exprésanse en unidades como molC m^{-2} ano^{-1} ou mmolC m^{-2} $día^{-1}$, magnitudes moi útiles para os investigadores, pero non demasiado intuitivas. A modo ilustrativo, unha captación de 1 molC m^{-2} ano^{-1} equivale aproximadamente á absorción anual de 44 toneladas de CO_2 por quilómetro cadrado de océano, mentres que un fluxo de 1 mmolC m^{-2} $día^{-1}$ representa unha captación de arredor de 16 toneladas de CO_2 por quilómetro cadrado e ano. Expresado nestes termos, o fluxo medio neto do océano global, duns 0,7 molC m^{-2} ano^{-1}, supón unha captación aproximada de 31 toneladas de CO_2 por quilómetro cadrado cada ano. En rexións con elevada capacidade de absorción, como o Atlántico Norte, os fluxos poden alcanzar valores próximos aos 5 molC m^{-2} ano^{-1}, o que equivale á retirada da atmosfera de arredor de 220 toneladas de CO_2 por quilómetro cadrado e ano.

Os fluxos nas zonas costeiras: a costa de Galicia

A complexidade para caracterizar os fluxos de CO_2 do océano global é especialmente evidente nas zonas costeiras, puntos quentes do ciclo do carbono por ser zonas de converxencia dos reservorios de carbono da atmosfera, o océano, os sedimentos mariños e os ecosistemas terrestres. Procesos como as achegas fluviais, o intercambio gasoso aire-mar, a elevada produción primaria, o enterramento e a remineralización nos sedimentos, a exportación de materia ou, nalgunhas rexións, a dinámica do xeo mariño desempeñan un papel fundamental nos fluxos de carbono. Como consecuencia, os sistemas costeiros constitúen un dos compoñentes máis dinámicos e complexos do intercambio de CO_2 entre o océano e a atmosfera, pois presentan magnitudes e variabilidades moi superiores ás observadas no océano aberto. A esta complexidade natural engádese a proximidade dos principais núcleos de poboación humana, que someten estas rexións a múltiples presións antropoxénicas, entre elas o cambio climático, a acidificación oceánica, a contaminación, a eutrofización, a sobrepesca e a degradación dos hábitats costeiros.

Entre estes sistemas costeiros, as rexións de afloramento destacan pola súa especial relevancia e complexidade, xa que nelas se produce unha forte interacción entre os procesos físicos e os ciclos bioxeoquímicos. A acción combinada do vento e da rotación terrestre pode desprazar as augas superficiais afastándoas da costa e favorece o ascenso de augas profundas frías, ricas en nutrientes

e con elevadas concentracións de CO_2. A ventilación destas augas cara á superficie tende a incrementar a pCO_2 superficial e a favorecer a emisión de CO_2 á atmosfera. Ao mesmo tempo, a fertilización asociada á achega de nutrientes estimula o crecemento do fitoplancto e a captación biolóxica de carbono, o que xera fortes gradientes espaciais e temporais nos intercambios aire-mar de CO_2.

A costa de Galicia representa un exemplo singular deste tipo de sistemas. Nela, a intermitencia dos episodios de afloramento asociados aos ventos do norte e os períodos de relaxación vinculados aos ventos do sur, xunto coa súa complexa xeomorfoloxía caracterizada pola presenza das rías, favorece un aproveitamento moi eficiente dos nutrientes e sostén elevadas taxas de produción primaria. Como consecuencia, esta rexión, ademais de ser un dos ecosistemas mariños máis produtivos dos océanos, presenta unha marcada heteroxeneidade espacial e temporal da pCO_2, resultado do equilibrio dinámico entre todas as características propias dunha zona costeira, a ventilación de augas profundas enriquecidas en CO_2 e a intensa captación biolóxica asociada ás floracións fitoplanctónicas estimuladas polo afloramento.

O primeiro traballo publicado que se baseou no uso de GASPAR foi do ano 2003. Realizouse con observacións na ría de Vigo e estivo asociado á tese de doutoramento de Jesús Gago, que tiña como título *Transformaciones biogeoquímicas y flujos de carbono en la Ría de Vigo. Estudio de la variación estacional y de corta escala*. Este estudo desenvolveuse no marco do proxecto CIRCA (Construción e validación dun modelo de circulación na ría de Vigo e a súa aplicación á descrición dos mecanismos forzadores e dos ciclos bioxeoquímicos), baseado en campañas oceanográficas repetidas realizadas co B/O Mytilus, o buque costeiro de 25 metros incorporado ao IIM-CSIC en 1997, que ampliou de forma notable as capacidades do instituto para a observación e investigación costeira.

Grazas á elevada frecuencia de mostraxe, os autores puideron seguir a resposta bioxeoquímica da ría de Vigo á sucesión de episodios de afloramento, relaxación e afundimento. Os resultados demostraron que a pCO_2 superficial podía variar desde condicións claramente subsaturadas con relación á atmosfera ata valores sobresaturados en escalas temporais de apenas uns días, como resposta á advección das augas profundas ricas en CO_2 ás capas superficiais da ría, que achegarían a superficie da ría ao equilibrio coa atmosfera ou incluso a comportarse de forma temporal como fonte de CO_2. Esta aportación de augas frías e ricas en nutrientes estimula o crecemento de fitoplancto, que exerce un

consumo biolóxico do CO_2, tal como amosou a estreita relación cos cambios de osíxeno, que levan de novo os niveis de pCO_2 por debaixo dos valores atmosféricos. Como consecuencia, a ría alternaba entre sumidoiro e fonte de CO_2 para a atmosfera. Esta elevada variabilidade puxo de manifesto a intensa interacción entre os procesos físicos ligados á circulación costeira, a produción primaria e a remineralización da materia orgánica. De feito, estimouse que arredor da metade da variabilidade observada na pCO_2 podía atribuírse aos procesos de transporte e mestura das masas de auga asociados ao réxime hidrolóxico da ría, mentres que a maior parte da fracción restante estaba controlada pola produción orgánica neta. Estes resultados supuxeron un avance significativo na comprensión da dinámica do CO_2 nas rías galegas, ao demostrar que a variabilidade asociada a escalas de poucos días resulta clave para entender o papel destes ecosistemas como sumidoiros ou fontes de CO_2 atmosférico.

Anos despois, Alba Marina Cobo Viveros, última doutoranda de Aida Fernández Ríos, coa tese *CO_2 flux variability in the Galician and Californian upwelling systems*, deulle continuidade a este traballo, pero poñendo o foco na plataforma continental galega, ese espazo de transición que conecta o océano aberto coas rías e onde tamén interactúan múltiples procesos físicos de distinta escala. Nesta rexión conflúen o afloramento e o afundimento; as achegas fluviais do Miño e incluso do Douro; a Corrente Polar Ibérica (IPC) —tamén coñecida como Corrente de Nadal—, que leva aguas relativamente cálidas e salinas desde o sur cara ás costas de Galicia e o golfo de Biscaia, e estruturas mesoescalares como filamentos e remuíños. Esta elevada complexidade hidrodinámica tradúcese nunha marcada heteroxeneidade espacial e temporal da distribución do CO_2 superficial.

O estudo analizou a variabilidade a curto prazo da pCO_2 superficial e dos fluxos aire-mar de CO_2 na plataforma galega ao longo de tres ciclos estacionais completos (2001-2004). Os resultados demostraron que, malia a elevada variabilidade temporal inducida por múltiples forzamentos físicos e biolóxicos, a plataforma continental galega actúa de forma consistente como un sumidoiro neto de CO_2 atmosférico. A variabilidade da pCO_2 estivo controlada por factores diferentes en función da estación: a salinidade explicou unha parte importante da variabilidade primaveral, ao reflectir a influencia das descargas fluviais e dos procesos de estratificación superficial, mentres que a temperatura superficial do mar se converteu no principal factor de control durante o verán e o inverno, xunto coa actividade biolóxica; na primavera e no outono, a fotosíntese reduciu significativamente a pCO_2 superficial e com-

pensou o enriquecemento en carbono inorgánico provocado polo afloramento de augas profundas. A escala anual tamén se observou unha considerable variabilidade interanual, o que evidenciou a necesidade de considerar series temporais longas abondo para cuantificar con precisión o papel das plataformas continentais no ciclo do carbono.

Esta investigación integrou os resultados de dous proxectos moi diferentes tanto na súa filosofía como na súa estratexia de observación. Os datos correspondentes ao primeiro ciclo estacional, entre maio de 2001 e abril de 2002 e descrito nesta publicación, proceden do proxecto DYBAGA (Dinámica y Biogeoquímica Anual en la Plataforma Gallega: Variación a Corta Escala). O traballo de campo de DYBAGA estaba baseado nunha serie de estacións hidrográficas distribuídas ao longo dun amplo rectángulo de mostraxe que tiña a ría de Vigo nun dos seus extremos e que se estendía sobre a plataforma continental galega. A bordo do B/O Mytilus realizábase unha monitorización continuada das propiedades físicas, químicas e biolóxicas do sistema, co obxectivo de capturar a súa variabilidade en escalas temporais curtas.

A frecuencia destas campañas foi extraordinaria. Das 52 semanas do período de estudo completáronse 47 saídas, o que supón un esforzo loxístico e de observación difícil de igualar incluso na actualidade. As campañas iniciábanse habitualmente durante a noite e prolongábanse ata o mediodía da xornada seguinte, e alcanzábanse estacións situadas a varias decenas de millas da costa. Visto desde a perspectiva actual, resulta difícil imaxinar que un buque das dimensións do B/O Mytilus puidese manter durante un ano un programa de observación tan intenso, e menos aínda en condicións que, en moitos aspectos, excederían os estándares actuais de seguridade e as condicións laborais que hoxe se consideran aceptables. Máis de dúas décadas despois, esta base de datos continúa sendo unha referencia fundamental para o estudo da dinámica bioxeoquímica da plataforma galega. Un exemplo da súa vixencia é que segue empregándose na validación de modelos bioxeoquímicos actuais.

Barcos de oportunidade para GASPAR

O segundo dos proxectos integrados no traballo de Alba Marina Cobo Viveros foi ECO (Evolución del Incremento de CO_2 usando Buques de Oportunidad: Costa de Galicia y Golfo de Vizcaya).

Liderado por Aida Fernández Ríos, este proxecto desenvolveuse no IIM-CSIC como contribución española ao programa europeo CAVASSOO (Carbon Variability Studies by Ships Of Opportunity), un proxecto internacional piloto financiado pola Unión Europea entre 2000 e 2003 para monitorizar e cuantificar a absorción de CO_2 no Atlántico Norte. Aida representou neste consorcio os intereses e as capacidades científicas nacionais nun momento clave para o desenvolvemento das observacións continuadas do carbono oceánico.

A filosofía de CAVASSOO era tan sinxela como revolucionaria: instalar sistemas autónomos de medición de pCO_2 en buques comerciais que realizasen rutas regulares, a fin de aproveitar a súa actividade habitual para obter observacións continuas do océano superficial. Fronte ás campañas oceanográficas tradicionais, limitadas polo elevado custo dos buques de investigación, que pode alcanzar varias decenas de miles de euros por día dependendo das súas dimensións e capacidades, os buques de oportunidade ofrecían a posibilidade de acadar unha cobertura espacial e temporal imposible con campañas convencionais cun custo moi inferior ou incluso nulo. Esta vantaxe resultaba especialmente relevante durante o inverno ou en rexións remotas, onde a realización de campañas oceanográficas é moi complexa. Pola contra, o tráfico marítimo comercial continúa operando con regularidade todo o ano, incluso baixo condicións meteorolóxicas adversas.

Esta estratexia permitía seguir a evolución do sistema carbonato ao longo do tempo en rexións oceánicas extensas, algo fundamental para detectar tendencias asociadas ao cambio climático. O transporte de froita entre América do Sur e Europa, portacontedores que conectaban Asia e América ou grandes transatlánticos polo Caribe convertéronse en excepcionais plataformas de observación oceanográfica. Grazas a elas foi posible incrementar de maneira extraordinaria o volume de datos dispoñibles e mellorar a comprensión da variabilidade do CO_2 no océano superficial.

Para o proxecto ECO, Aida Fernández Ríos contactou co Grupo Suardiaz, a empresa encargada naquela época do transporte marítimo dos vehículos producidos por PSA Peugeot Citroën en Vigo ata Saint-Nazaire, na desembocadura do Loira, en Francia. Grazas á colaboración da compañía foi posible instalar o sistema GASPAR nunha ruta comercial regular e converter os seus buques nunha plataforma de observación oceanográfica continua. Falamos en plural porque a adaptación para aloxar a GASPAR se realizou en dous destes barcos coñecidos como *car carriers*, buques *ro-ro*

(*roll-on/roll-off*) ou simplemente *rolóns*. Foron o L'Audace e o La Surprise, dous buques xemelgos construídos nos estaleiros Barreras de Vigo que tiñan 142 metros de eslora, 21 metros de manga e capacidade para transportar máis de 1250 coches nas súas cubertas. Estas embarcacións desprazábanse a 18 nós, polo que a distancia entre Vigo e Saint-Nazaire, cunha precisión case metronómica, se cubría en pouco máis de 24 horas para en tres días completar a ida e a volta, incluídos os traballos de carga e descarga. Esta extraordinaria regularidade e a ruta escollida facía deles unha plataforma ideal para obter observacións repetidas na saída da ría de Vigo, na plataforma galega, no interior do golfo de Biscaia e na plataforma francesa occidental.

Unha oportunidade para GASPAR e para min

Uns meses antes do inicio do proxecto ECO, obtiven unha das xa desaparecidas bolsas predoutorais da Deputación de Pontevedra para incorporarme ao IIM-CSIC. Como parte do proceso de selección, os candidatos debiamos analizar e defender un artigo científico diante dun tribunal formado por persoal investigador do centro. Por unha desas coincidencias e reviravoltas coas que se podería aliñar unha boa historia, o artigo que chegou ás miñas mans foi precisamente o citado traballo de Taro Takahashi de 1997 no que se cartografaba de xeito global a absorción de CO_2 dos océanos, estimada entre 0,60 e 1,34 GtC ano^{-1} para o ano 1990 a partir de medicións directas. Con todo, entre as distintas liñas de investigación ofertadas polos grupos do IIM había outras opcións que me resultaban especialmente atractivas por estaren ligadas de xeito directo cos recursos mariños e as súas implicacións socioeconómicas, aspectos que sempre me pareceron de moitísimo interese pola súa conexión directa co sector pesqueiro e a vida das comunidades costeiras.

Mentres valoraba aquelas opcións, coñecín a Aida Fernández Ríos case por casualidade durante a segunda das miñas visitas ao IIM, onde ía recibir información máis concreta sobre as distintas posibilidades de traballo. O encontro e a conversa xurdiron de maneira espontánea, ou non tanto, pero acabaron resultando decisivos. O entusiasmo co que falaba da investigación e da oportunidade de contribuír a comprender o papel do océano no clima terrestre resultoume moi estimulante, ao igual que participar nun proxecto multidisciplinario que combinaba oceanografía,

química, bioloxía e clima, ao abordar un problema de alcance global pero con implicacións locais concretas. A posibilidade de participar en campañas oceanográficas e visitar a outra beira do océano acabaron por convencerme.

Durante aquela primeira conversa con Aida descubrimos tamén conexións persoais que ambos descoñeciamos, o que contribuíu a crear unha complicidade natural e inesperada. Pero, por enriba de todo, o que realmente me convenceu foi a confianza sincera que me transmitiu sobre o labor que podería chegar a desenvolver. A pesar de ser un estudante na procura dunha oportunidade para iniciarse na investigación e con certa urxencia por atopar financiamento, as súas palabras fixéronme sentir que aquela oportunidade podía significar moito máis que unha bolsa. E así foi como Fiz Fernández Pérez e Aida Fernández Ríos se converteron nos meus directores de tese. Aquel encontro marcaría profundamente a miña traxectoria profesional e persoal.

Co paso do tempo comprendín que aquela actitude non foi un xesto impostado co que convencer un estudante, senón a expresión sincera dunha forma de entender a vida. Como non ía ser así logo de reinventarse tantas veces e asumir sempre responsabilidades cada vez maiores? Aida sempre creu no valor do esforzo colectivo que representa a investigación científica e comprendía como poucas persoas a importancia do persoal técnico, do traballo silencioso e tantas veces silenciado que sosteñen os laboratorios, as campañas e os proxectos. Ao mesmo tempo, nunca se amedrentou ante os retos. Tiña a determinación, a intelixencia e a capacidade necesarias para afrontar con entusiasmo, bo humor e un sorriso cada un dos desafíos profesionais que foi asumindo, ao tempo que avanzaba, paso a paso, por todos os chanzos da carreira técnica e científica. Co seu exemplo completou aquelas primeiras palabras que compartimos máis que ningunha outra dos centos de conversas que tivemos.

Unha vez tomada a decisión, dedicamos os meses seguintes a mellorar a GASPAR. Nesta fase da miña tese de doutoramento deseñouse un novo sistema de electroválvulas e desenvolveuse un software de control en Microsoft Visual Basic que permitía xestionar os distintos modos de funcionamento, así como a adquisición, visualización e rexistro das medicións. Ademais, esta nova versión incorporou sensores de temperatura, salinidade, clorofila e osíxeno disolto, o que ampliou as súas capacidades e autonomía operativa. Así, esta mellora permitía instalar este novo GASPAR en buques de oportunidade, que, a diferenza dos buques de investigación, non dispoñen de sistemas de adquisi-

ción de datos oceanográficos. A monitorización de temperatura, salinidade, clorofila e osíxeno disolto proporcionaba información esencial para interpretar os procesos físicos e biolóxicos responsables da variabilidade observada nos datos de CO_2. Ademais, a salinidade e a temperatura son imprescindibles para realizar o procesamento destas medicións, estimar a presión do vapor de auga no equilibrador e poder facer as correccións pertinentes, así como para converter os valores de pCO_2 medidos no equilibrador de GASPAR ás condicións reais da superficie mariña. Por un lado, hai que facer a corrección da temperatura entre o equilibrador e o dato de temperatura da superficie mariña, estimado por Taro Takahashi en 4,23 µatm $ºC^{-1}$. Antes desa corrección de temperatura, tamén se fai a transformación de presión parcial de CO_2 en fugacidade de CO_2 (fCO_2), que en realidade é o parámetro de CO_2 máis axeitado para estimar os intercambios de carbono entre o océano e a atmosfera.

Aínda que a pCO_2 foi durante décadas a variable empregada habitualmente nos estudos de fluxos aire-mar, a súa definición asume un comportamento ideal dos gases. Pola contra, a fugacidade corrixe esta idealización e considera factores como a interacción entre moléculas ou o propio volume das moléculas para estimar a presión parcial efectiva do CO_2. Nas condicións da superficie oceánica, a fugacidade sempre é menor que a presión parcial, xa que predominan as forzas atractivas entre moléculas, polo que a presión que exercen é menor que a ideal. As diferenzas son pequenas, arredor do 0,3 % na atmosfera e entre o 0,3 % e o 0,7 % na superficie mariña, valores comparables coa precisión dos equipos analíticos actuais. Con todo, esta corrección está incluída en todas as metodoloxías e protocolos operativos como parte das recomendacións para mellorar a estimación dos fluxos de CO_2.

Naqueles meses tamén aproveitamos para construír en paralelo un segundo sistema GASPAR destinado á Universidad de Cádiz, unha institución coa que Aida Fernández Ríos e Fiz Fernández Pérez mantiñan unha estreita colaboración científica grazas á relación cos investigadores Abelardo Gómez-Parra e Jesús Forja, do Departamento de Química Física. Nesa tarefa e xunto con Mercedes de la Paz, doutoranda do grupo gaditano e responsable da montaxe manual do seu equipo, pasamos semanas entre sensores, válvulas, tubaxes e sistemas electrónicos, ensamblando peza a peza un instrumento que, como era habitual naqueles anos, debía ser construído practicamente de forma artesanal. Aquela colaboración transformouse nunha estreita amizade entre ambos os grupos, asentada nas innumerables horas de traballo compartidas e tamén en todo o tempo dedicado, cada un desde o

seu laboratorio, a facer funcionar e mellorar os respectivos sistemas GASPAR. A propósito deste novo instrumento, Aida deixaría por escrito estas palabras: «Su hermano gemelo se llama GASPAR DE LA MERCED, para no perder sus orígenes y porque se marcha mañana para Andalucía. Se va concretamente a Cádiz, que es La Habana con más salero, como dice la copla que cantaba Carlos Cano».

E así, aqueles dous equipos GASPAR, construídos en paralelo, separáronse para iniciaren a súa propia vida analítica. O GASPAR *quillo* volveu á súa Universidad de Cádiz e traballou no estreito de Xibraltar, na baía de Cádiz, navegou polas augas do Guadalquivir e permaneceu durante longos períodos no tranquilo río de San Pedro, que se agocha detrás da antiga cidade de Gadir. Pola súa parte, o *noso* GASPAR instalouse a bordo do L'Audace en setembro de 2002.

Daquelas primeiras viaxes acompañando milleiros de vehículos Citroën e Peugeot coas que comezou a construírse a base de datos da miña tese de doutoramento, o recordo máis vivo que conservo non son as novidades que supoñía vivir e traballar boa parte da semana a bordo dun buque comercial. O acontecemento máis presente daqueles días é o afundimento do Prestige. GASPAR e eu vivimos a maior catástrofe ambiental da historia recente de Galicia desde o mar. En terra, os meus compañeiros e compañeiras do IIM poñían todo o seu coñecemento e capacidade ao servizo da emerxencia. Na costa, a chegada do chapapote converteuse no negro pesadelo que todos lembramos, e as súas pegadas continuaron sendo visibles moito despois de decembro de 2004, cando GASPAR xa rematara tras completar 116 transectos de ida e outros tantos de volta. Este episodio marcou profundamente a sociedade galega e tamén a toda unha xeración de científicas e científicos ligados ao mar que sentimos como nunca a importancia de converter a nosa disciplina científica nunha ferramenta operativa que permita comprender, avaliar e afrontar os grandes desafíos ambientais que temos por diante.

Resultados de dous anos de medicións de GASPAR

Neses dous anos de medicións na plataforma galega, no golfo de Biscaia, na plataforma armoricana e na desembocadura do río Loira, tamén navegamos ao longo da canle da Mancha en repetidas ocasións por necesidades de última hora no servizo da empresa. Así, chegamos a asomarnos ao Mar do Norte e a atracar en portos como Sheerness, no estuario do Támesis, ou Zeebrugge,

na costa belga. Isto fixo que tivésemos a oportunidade, nunca mellor dito, de ampliar as observacións de GASPAR ata outros sistemas costeiros europeos que non tiñamos previstos.

As medicións realizadas na canle da Mancha revelaron unha marcada heteroxeneidade espacial da fCO_2 da superficie do mar, con gradientes lonxitudinais e latitudinais moi acusados, sobre todo asociados ás plumas fluviais. Os resultados puxeron de manifesto que a mestura entre augas oceánicas e continentais, xunto coa actividade biolóxica primaveral, constitúe un dos principais mecanismos de control do balance rexional de CO_2 neste brazo de mar que conecta o Atlántico co Mar do Norte. Pola súa banda, a plataforma continental francesa tamén mostrou unha elevada variabilidade espacial estreitamente relacionada coa distancia ao estuario do Loira. O interior do estuario e a súa zona proximal compórtanse como unha fonte de CO_2 para a atmosfera, cun fluxo medio de arredor de 22 mmol m^{-2} d^{-1}. Este comportamento está asociado á intensa remineralización da materia orgánica e á achega de augas continentais enriquecidas en CO_2. Pola contra, máis aló dos 25 quilómetros da desembocadura, as augas da plataforma actúan como un sumidoiro de CO_2, con taxas medias de absorción comprendidas entre os −5 e os −8 mmol m^{-2} d^{-1}. Nesta rexión predominan os procesos fotosintéticos, que favorecen unha intensa captación de CO_2 atmosférico. Nas zonas máis próximas á costa, a absorción fitoplanctónica do CO_2 é superior, pero esta actividade biolóxica non é capaz de reverter o elevado contido de CO_2 transportado polas augas do esteiro, o que explica a transición gradual entre a plataforma proximal que emite CO_2 e a outra distal, claramente absorbente.

Ademais das diferentes plataformas continentais caracterizadas por GASPAR, a zona oceánica do interior do golfo de Biscaia foi a zona monitorizada de xeito máis intenso. Os dous anos de medicións en continuo, complementadas con outras mostras discretas, completaron unha base de datos que nos permitiu analizar a dinámica do CO_2 neste sistema. Os resultados revelaron unha notable variabilidade interanual, en particular durante o inverno, asociada ás diferenzas na intensidade dos procesos de mestura da columna de auga, que, ademais da pCO_2, tamén condicionou a fertilización da auga superficial e a posterior actividade fitoplanctónica da primavera. En conxunto, as augas superficiais do golfo de Biscaia comportáronse como un sumidoiro de CO_2 atmosférico, aínda que puntualmente, durante o verán, o incremento da temperatura converteu estas augas en fontes de

CO_2 á atmosfera. As taxas anuais de captación situáronse entre 1,3 ± 0,1 e 2,4 ± 0,1 molC $m^{-2}ano^{-1}$, valores que superan os estimados para outras rexións próximas do Atlántico Norte.

Ademais da caracterización dos intercambios de CO_2 no golfo de Biscaia, o proxecto ECO tamén foi pioneiro na aplicación de metodoloxías que hoxe son ferramentas básicas para a extrapolación espacial e temporal dos datos de pCO_2 a escala tanto rexional como global. Neste contexto, e grazas aos contactos científicos establecidos por Aida Fernández Ríos coa investigadora Emma Huertas do Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía durante a súa participación no proxecto CARBOOCEAN (Marine Carbon Sources and Sinks Assessment), desenvolveuse un algoritmo empírico baseado en observacións por satélite da temperatura superficial do mar e da concentración de clorofila. Esta aproximación permitiu reconstruír a evolución dos fluxos aire-mar de CO_2 no golfo de Biscaia entre 1997 e 2004 a partir das relacións establecidas entre as medicións de pCO_2 realizadas por GASPAR e as observacións remotas destas variables ambientais. A análise desta serie temporal revelou o papel determinante do vento na captación oceánica de carbono, xa que máis da metade da variabilidade interanual dos fluxos de CO_2 estaba asociada ás variacións na velocidade de transferencia gasosa entre a atmosfera e o océano.

Outra aproximación pioneira para a extrapolación dos fluxos de CO_2 foi a aplicación de técnicas de intelixencia artificial ao estudo do sistema de CO_2 superficial do Atlántico Norte. Empregando mapas autoorganizados (SOM, Self-Organizing Maps), reconstruíuse a distribución espacial e temporal do CO_2 a partir de observacións por satélite da concentración de clorofila e de resultados de modelos de temperatura superficial do mar e da profundidade da capa de mestura. Aquel traballo situouse entre os primeiros estudos que exploraban o potencial das técnicas de aprendizaxe automática en oceanografía, nun momento en que estas metodoloxías apenas comezaban a abrirse camiño nas ciencias mariñas.

FICARAM: as campañas transatlánticas de Aida Fernández Ríos e GASPAR

Ademais da liña ECO, outro dos proxectos liderados por Aida Fernández Ríos e que quedou estreitamente ligado a GASPAR foi FICARAM (Fluxos de Intercambio Aire-Mar nunha Sección Meridional

do Océano Atlántico). Este proxecto recuperaba o espírito das grandes seccións hidrográficas internacionais desenvolvidas a escala de conca durante o programa WOCE. Aproveitando os tránsitos de ida e volta dos buques das campañas antárticas españolas, FICARAM propoñía realizar unha sección meridional continua ao longo do Atlántico, desde a Península Ibérica ata A Patagonia. Esta estratexia permitía combinar as históricas seccións A16 do Atlántico Norte e A17 do Atlántico Sur. A repetición do transecto FICARAM no tempo achegou unha valiosa visión da bioxeoquímica ao longo do océano Atlántico.

GASPAR rexistrou medicións continuas de pCO_2 superficial ao longo de milleiros de quilómetros de navegación entre 2000 e 2008, a bordo do BIO Hespérides e do remolcador Las Palmas. Os datos obtidos nestas campañas permitiron describir a distribución espacial do CO_2 superficial e cuantificar os fluxos aire-mar en gran parte da conca atlántica. Os resultados confirmaron que o Atlántico funciona, en termos xerais, como un importante sumidoiro de CO_2 atmosférico, cunha marcada heteroxeneidade espacial e estacional asociada ás distintas provincias bioxeoquímicas. Nas rexións subtropicais observouse unha alternancia estacional, entre condicións de captación durante a primavera e episodios de emisión no outono, mentres que as altas latitudes mantiveron unha elevada capacidade de absorción ao longo do ano. As campañas repetidas revelaron tamén variacións interanuais asociadas a forzamentos climáticos de grande escala, ao detectarse unha lixeira diminución da capacidade de captación de CO_2 no Atlántico Norte ao longo do período estudado. Ademais, as medicións de fCO_2 de GASPAR reproduciron con gran precisión as climatoloxías globais dispoñibles, o que validou a robustez, consistencia e representatividade do conxunto de datos xerado. Esta concordancia confirmou a fiabilidade das medicións realizadas e consolidou o valor das seccións oceánicas repetidas como unha ferramenta fundamental para o estudo do ciclo do carbono.

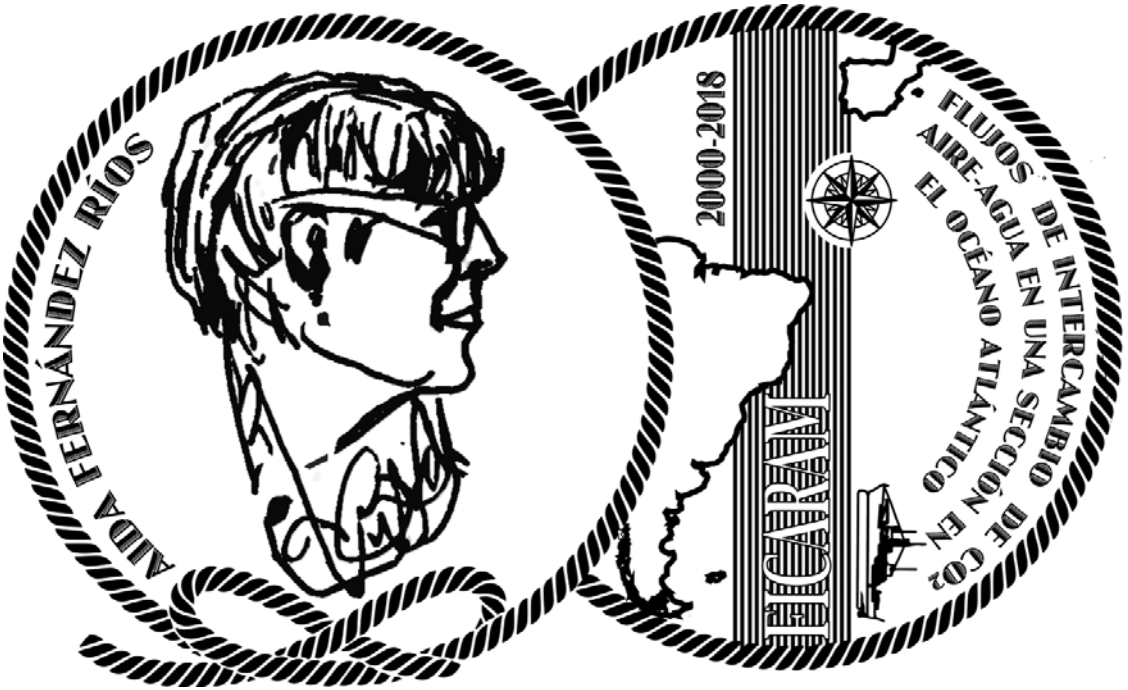
A sección FICARAM realizouse como campaña hidrográfica clásica nos anos 2001, 2002, 2013 e 2019, e volverá repetirse na primavera de 2027, consolidada como unha das series de observación máis valiosas para o estudo do ciclo do carbono no Atlántico. A campaña de 2013, correspondente á décimo quinta repetición do transecto FICARAM e realizada a bordo do BIO Hespérides, foi a última navegación de Aida Fernández Ríos, que pechou así unha traxectoria de máis de cincocentos días de mar. Durante o primeiro tramo da sección, entre Punta Arenas (Chile) e Recife (O Brasil), exerceu ademais como xefa de campaña. Naqueles días compartimos travesía con compañeiras do Instituto

de Ciencias do Mar de Barcelona e lembro a Aida especialmente feliz, relaxada e satisfeita tras tantos anos de dedicación á oceanografía. Na última estación da campaña, a derradeira botella Niskin foi substituída por unha botella chea de cervexa. Como tantas outras veces ao longo da súa carreira, Aida achegouse á roseta co termómetro na man e o frasco preparado para recoller a particular mostra. Tras a inevitable sorpresa e as risas cómplices das e dos compañeiros, chegaron as felicitacións, as apertas e o brinde polo traballo no mar que comezara corenta anos atrás. Horas despois e aínda en cuberta, pola popa do buque comezaba a abrir o día que iluminaba unha costa espectacular.

Encadeando o traballo, o valor e o legado

Ao longo das últimas dúas décadas da súa vida, Aida Fernández Ríos participou en tres dos proxectos europeos máis relevantes dedicados a comprender o papel do océano no ciclo global do carbono e que estiveron ligados a GASPAR ao longo da súa vida operativa (figura 3). Participou como parte da representación de España no grupo internacional de persoal investigador que transformaría a forma de observar, cuantificar e interpretar os intercambios de CO_2 entre o océano e a atmosfera. O primeiro destes grandes programas foi CAVASSOO, desenvolvido a comezos dos anos 2000, cando as observacións de CO_2 superficial eran aínda escasas, descontinuas e limitadas. O seu obxectivo era multiplicar a cobertura espacial e temporal das observacións mediante sistemas automáticos de medición en buques comerciais e oceanográficos para xerar rexistros continuos ao longo de rutas marítimas regulares. Estes traballos demostraron que as observacións sostidas no tempo a partir de estratexias economicamente sustentables eran imprescindibles para avaliar os intercambios de CO_2 a escala global. Darlles continuidade ás observacións e cuantificar con precisión os sumidoiros e as fontes de carbono do océano foi o propósito central de CARBOOCEAN, un dos maiores proxectos europeos dedicados ao estudo do carbono mariño. Para iso, integrou observacións *in situ*, experimentación e modelización numérica co obxectivo de construír unha visión global do funcionamento do ciclo do carbono oceánico. Os seus resultados contribuíron de forma decisiva ás estimacións empregadas polo IPCC (Grupo Intergobernamental de Expertos sobre o Cambio Climático da ONU) e consolidaron o papel do océano como un dos principais reguladores do clima terrestre.

A seguinte etapa chegou con CARBOCHANGE (Changes in Carbon Uptake and Emissions by Oceans in a Changing Climate). Ademais de cuantificar a absorción de CO_2 por parte dos océanos, este proxecto pretendía comprender como respondería a captación oceánica de carbono nun escenario de cambio climático. O seu obxectivo era comprender os mecanismos bioxeoquímicos que determinarían a súa evolución nun clima cambiante. Desde o punto de vista operativo, este desafío requiría construír redes de observación capaces de detectar tendencias de longo prazo, para o cal integraron rutas marítimas regulares, estacións fixas e campañas repetidas no tempo en redes internacionais de observación.



Selo homenaxe a Aida Fernández Ríos e ao proxecto FICARAM.
Debuxo de Aida do seu amigo persoal o pintor Antón Pulido

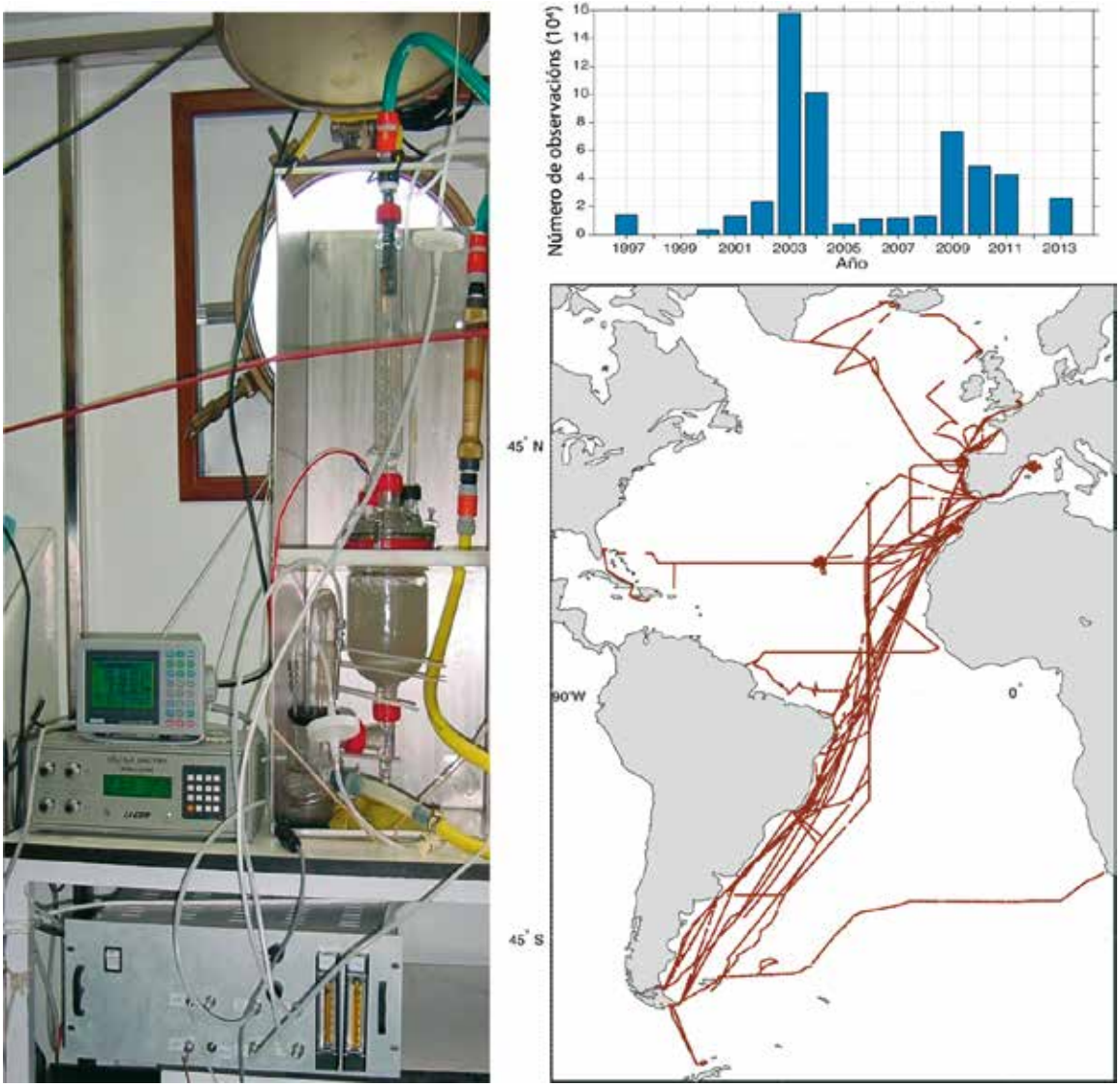


Figura 3. Fotografía de GASPAR e distribución temporal e espacial das medicións realizadas por GASPAR

O éxito científico e tecnolóxico alcanzado por estes proxectos sentou as bases para crear SOCAT (Surface Ocean CO_2 Atlas), unha das iniciativas internacionais máis relevantes para o estudo do ciclo do carbono oceánico e na cal Aida Fernández Ríos participou de forma activa desde a súa xestación. O obxectivo de SOCAT é recompilar, harmonizar, validar e distribuír as observacións de fugacidade de CO_2 superficial obtidas en océanos e mares costeiros de todo o mundo, para construír unha base de datos global baixo esixentes protocolos de control de calidade e desenvolver produtos espaciais que permitan describir con precisión a distribución do CO_2 superficial oceánico. Deste xeito, SOCAT recolle e amplía o legado iniciado por Taro Takahashi e por aquela comunidade científica internacional que elaborou as primeiras climatoloxías globais do fluxo de CO_2 entre o océano e a atmosfera. Estas climatoloxías demostraron o enorme valor científico destas observacións sistemáticas que puxeron de manifesto a necesidade dunha infraestrutura capaz de integrar e estandarizar as medicións realizadas por diferentes grupos de investigación. Tanto foi así que a primeira climatoloxía de SOCAT publicada en 2011 incluía 6,3 millóns de observacións de fCO_2 na superficie do océano, o que dobraba as empregadas na última das climatoloxías globais publicadas por Takahashi en 2009. Desde aquela data, a recollida de medicións de fCO_2 foi extraordinaria. Na actualidade, SOCAT supera xa os 44 millóns de observacións neste 2026 e é a principal infraestrutura internacional para a síntese e distribución de observacións de CO_2 superficial oceánico.

Ata comezos dos anos 2000 as medicións continuas de CO_2 superficial realizábanse mediante aqueles sistemas como GASPAR, desenvolvidos polos propios grupos de investigación case de maneira artesanal en campañas oceanográficas illadas. Aínda que todos estes equipos compartían a mesma metodoloxía analítica —un equilibrador aire-auga conectado a un analizador infravermello para medir a concentración de CO_2—, o deseño dos equipos era bastante heteroxéneo. Tal como amosaron os exercicios de intercomparación, aquela diversidade, resultado das ideas e potenciais melloras de cada grupo de investigación, producía resultados significativamente diferentes baixo condicións semellantes. Aquelas campañas de intercomparación realizadas a finais dos anos noventa amosaron pequenas diferenzas na medición da temperatura e da presión ou nos algoritmos empregados para calcular a fugacidade que producían erros significativos. Nun contexto en que se pretendía reducir as incertezas dos balances globais de carbono e validar os modelos climáticos, resultaba evidente a necesidade de harmonizar metodoloxías.

Aida asistindo a GASPAR durante a campaña FICARAM-2, realizada entre marzo e abril de 2001
a bordo do BIO Hespérides

A principios de século, a comunidade científica decidiu definir de maneira colectiva o deseño dun sistema autónomo estandarizado para a medición continua de fCO_2 na superficie do océano e acordar cales debían ser as especificacións técnicas para garantir observacións cunha precisión de 2 µatm, valor compatible cos obxectivos dos programas internacionais de observación climática para restrinxir a incerteza dos fluxos de carbono a 0,2 PgC ano^{-1}. Aquel equipo desexado acabou converténdose nunha realidade: comercializado por General Oceanics desde finais da primeira década dos anos 2000, estes equipos transformaron a observación do CO_2 superficial e son, no día de hoxe, responsables dunha parte substancial dos millóns de observacións que alimentan as bases de datos globais. A suma de todas estas unidades aloxadas en diferentes tipos de barcos forma parte dunha infraestrutura de observación global capaz de proporcionar información consistente, comparable e de alta calidade para o estudo do cambio climático, que é herdeira daqueles sistemas pioneiros desenvolvidos por grupos de investigación.

A medida que as observacións de CO_2 oceánico melloraron a súa precisión dentro dunha crecente base de datos internacional, fíxose evidente a necesidade de converter esta información en coñecemento útil para a sociedade. Neste contexto, as observacións de carbono mariño organizáronse progresivamente nunha auténtica cadea de valor científico formada por diferentes programas e redes internacionais que conectan a adquisición dos datos en calquera punto do océano co seu uso nos principais informes internacionais sobre cambio climático.

Relacionados coas redes de observación están ICOS (Integrated Carbon Observation System), en Europa, e SOCONET (Surface Ocean CO_2 Reference Observation Network), a escala global, que coordinan a obtención de medicións en diferentes plataformas, estacións, boias etc. O seu obxectivo é garantir que as observacións de CO_2 se realicen seguindo protocolos comúns, con sistemas calibrados e rastrexables segundo estándares internacionais. Estas observacións pasan a formar parte de grandes repositorios internacionais, nos que SOCAT é o principal referente. No seguinte elo desa cadea está o uso destas observacións para alimentar modelos bioxeoquímicos globais e sistemas de análise como SOCOM (Southern Ocean Carbon and Climate Observations and Modeling), a fin de mellorar a estimación dos fluxos de carbono. Esta información intégrase en sistemas globais de seguimento climático como GOOS (Global Ocean Observing System), que coordina as observacións oceánicas esenciais a escala planetaria, mentres que GCOS (Global Climate Observing System)

identifica as variables climáticas esenciais necesarias para monitorizar a evolución do sistema climático terrestre, no que o CO_2 oceánico é unha variable estratéxica. Deste xeito, as medicións realizadas por un analizador de CO_2 instalado nun buque que atravesa o Atlántico poden acabar contribuíndo, anos máis tarde, ás estimacións globais do balance de carbono, aos informes do IPCC ou ás avaliacións internacionais sobre o estado do clima. Esta conexión entre as iniciativas de observación desenvolvidas en diferentes lugares do océano e o coñecemento global representa unha das transformacións máis importantes da oceanografía moderna e constitúe unha parte esencial da contribución científica de Aida Fernández Ríos.

A traxectoria de Aida amosa o percorrido da investigación sobre o intercambio de CO_2 entre o océano e a atmosfera durante as últimas décadas, desde os primeiros pasos para establecer sistemas de observación en continuo ata a creación de bases de datos globais. Máis alá dos datos, dos proxectos e das publicacións, o legado de Aida reside na súa contribución a un esforzo colectivo internacional que conseguiu superar as limitacións técnicas e operativas da observación oceánica para construír unha infraestrutura global capaz de comprender con maior precisión o papel do océano na regulación do clima terrestre e anticipar a súa evolución futura.

O avance destes estudos e a propia traxectoria de Aida constitúen dúas historias extraordinarias de transformación da oceanografía contemporánea.

Referencias bibliográficas

Fay A.R., Munro D.R., McKinley G.A., Pierrot D., Sutherland S.C., Sweeney C., Wanninkhof R. (2024). Updated climatological mean ΔfCO_2 and net sea–air CO_2 flux over the global open ocean regions. Earth System Science Data, 16 (4), 2123-2139.

Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M.W., Andrew R.M., Bakker D.C.E., Hauck J., Landschützer P. et al. (2025). Global carbon budget 2025. Earth System Science Data Discussions, 1-139.

Revelle R., Suess H.E. (1957). Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of atmospheric CO_2 during the past decades. Tellus, 9 (1), 18-27.

Takahashi T. (1961). Carbon dioxide in the atmosphere and in Atlantic Ocean water. Journal of Geophysical Research, 66 (2), 477-494.

Takahashi T., Feely R. A., Weiss R. F., Wanninkhof R. H., Chipman D. W., Sutherland S. C. & Takahashi T. T. (1997). Global air-sea flux of CO_2: An estimate based on measurements of sea-air pCO_2 difference. Proceedings of the National Academy of Sciences, 94 (16), 8292-8299.

Takahashi T., Sutherland S. C., Wanninkhof R., Sweeney C., Feely R. A., Chipman D. W., ... & De Baar H. J. (2009). Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO_2, and net sea-air CO_2 flux over the global oceans. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 56 (8-10), 554-577.

Weiss R.F. (1974). Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non-ideal gas. Marine Chemistry, 2 (3), 203-215.

Aida e o periplo oceánico do CO_2

Gabriel Rosón Porto
Facultade de Ciencias do Mar (Universidade de Vigo)

No se puede nunca atravesar el océano si
no se tiene el valor de perder de vista la orilla
André Gide

Quenta que saes!

Luns 9 de xaneiro de 1989. Chego de bolseiro por vez primeira ao laboratorio do Instituto de Investigacións Mariñas (IIM) de Vigo do Consello Superior de Investigacións Científicas. Recíbeme Aida cun sorriso, preséntame o equipo, indícame cal é a miña mesa de traballo, déixame uns *papers* para ler e dime:

- Mañá ás 6 e media da mañá aquí, que saes comigo ao mar.
- Por que tan pronto?
- Pola marea.

Primeira lección: ao mar vaise cando se ten que ir. Ela estaba na fase final dun ciclo anual de mostraxes quincenais para a súa tese, nun punto central da ría de Vigo (que logo se estenderon 10 anos máis, a «estación fixa»), a bordo da pequena embarcación do Instituto Lampadena, patroneada por Ricardo Casal e asistida por Ramón Penín. Ensinoume como se facía a mostraxe de botellas Niskin, os mensaxeiros, o disco de Secchi, a medida dos termómetros de inversión, a toma de mostra para salinidade, osíxeno e o tempo (vento, nebulosidade, ondada). Toda a información recollida nas follas estatísticas. Ao chegar ao laboratorio indicoume como se filtraba a auga para a análise de elemental de CNH. E, pola tarde, amosoume como se analizaban a salinidade e o osíxeno. Primeiro día completo, mestra. A partir de aí, cada vez que alguén me preguntaba a que me dedicaba, dicíalle:

- Eu collo auga…

Aínda que iso só é o primeiro paso do asunto. Non obstante, aquel día Aida inculcoume que é un paso crítico, se non se fai de forma coidadosa, ordenada e metódica, non te vas poder fiar dos datos… e todo se bota a perder. Este capítulo amosa unha pequena parte da información que Aida extraeu de moitos outros datos oceanográficos… porque estaban correctamente mostrados.

Introdución: a bomba de carbono

Aínda que certas zonas do océano se comportan como fontes de CO_2 á atmosfera e outras zonas actúan como sumidoiros de CO_2 atmosférico, globalmente o océano represéntase netamente como un sumidoiro. Este feito ten consecuencias importantes para o ciclo do carbono no océano. Neste capítulo exporanse algunhas delas, que particularmente Aida explorou no océano Atlántico.

O conxunto de procesos polos que o océano captura CO_2 da atmosfera e os almacena durante longos períodos (desde décadas ata miles de anos) denomínase bomba de carbono oceánica e é clave para regular o clima do planeta. Divídese en tres contribucións, dependendo da natureza do proceso involucrado.

Por unha banda, un dos principais mecanismos polos que o océano retira carbono da atmosfera é a chamada bomba biolóxica. Na superficie do mar, o fitoplancto capta CO_2 mediante a fotosíntese e transfórmao en materia orgánica. Cando estes organismos morren —ou tras ser consumidos—, os seus restos afúndense cara ás augas profundas e parte dese carbono acaba incorporándose aos sedimentos do fondo oceánico, onde permanece almacenado fóra da atmosfera durante longos períodos.

Por outra banda, a bomba de solubilidade depende de procesos físicos. O CO_2 disólvese na auga, especialmente nas rexións frías, onde as augas ricas en carbono son máis densas e poden afundirse cara ao océano profundo. Este mecanismo está estreitamente ligado á circulación termohalina e permite que o carbono quede almacenado lonxe da atmosfera durante longos períodos.

Por último, está a bomba de carbonato, que involucra organismos que forman cunchas calcarias (por exemplo, mexillóns ou foraminíferos). Estes organismos mariños producen carbonato cálcico ($CaCO_3$) e retiran carbonato do medio mariño. Ao morrer, as súas cunchas afúndense e almacénanse nos sedimentos.

Globalmente, a bomba de carbono absorbe anualmente aproximadamente un 30 % do CO_2 emitido polas actividades humanas. Sen a existencia da bomba, o quecemento global sería moito máis intenso, polo que é unha reguladora clave do ciclo do carbono.

Aida tamén é a bomba

Falando de bombas, unha divertida anécdota de Aida sucedeu no control de pasaxeiros dalgún aeroporto internacional de tránsito para un embarque. Naquel tempo, utilizabamos no laboratorio do barco as típicas bombas de acuario para gurgullar a auga do mar. Normalmente, o material de campaña enviabámolo con tempo ao porto de onde partía o barco, pero Aida debeu pensar que as bombas que enviaramos non eran suficientes e levou, a última hora, na súa equipaxe persoal unha bomba máis. Ao pasar a súa maleta polo escáner, este detectou o artefacto e o empregado policial preguntoulle a Aida en inglés que era iso, ao que ela contestou sen pensar:

- This is a *bomb*.

Cando lle abriron a maleta, viron un traste para nada habitual e cheo de cables, e case temos lío coa autoridade. Tivo que convencelos de que realmente era unha *pump*. Así era Aida.

Separar o CO_2 antropoxénico: unha viaxe no tempo ao océano preindustrial

O CO_2 total que se mide nunha mostra en calquera lugar e a calquera profundidade do océano actual pode dividirse en dúas fraccións: por un lado, o CO_2 natural (ou preindustrial),

que é o que tiña o océano antes da Revolución Industrial (~1800), resultado dos procesos naturais do sistema terrestre. E, por outro lado, o CO_2 antropoxénico (ou antrópico), que é o que o océano foi incorporando desde a Revolución Industrial. A mala noticia é que o CO_2 natural e o antropoxénico son indistinguibles quimicamente. A pesar disto, é posible illar a fracción antrópica. A filosofía é restar do CO_2 total medible dunha mostra as contribucións dos procesos que o modificou tras o momento da formación das masas de auga (que é cando cesa o intercambio de CO_2 coa atmosfera).

Para iso, avalíase, en primeiro lugar, o CO_2 inicial da masa de auga, coñecido como *CO_2 preformado actual*, é dicir, o contido de CO_2 que tiña cando se encontraba na superficie do océano en equilibrio coa atmosfera. Esta estimación obtense restándolle ao CO_2 total medido a cantidade de CO_2 engadida posteriormente por procesos internos da masa de auga desde que deixou de intercambiar gases coa atmosfera. O dito CO_2 adicional procede principalmente da oxidación da materia orgánica, avaliada a partir das relacións estequiométricas de Redfield, e da disolución bioxénica de carbonato cálcico, que se cuantifica mediante a alcalinidade total.

Por outra parte, é posible estimar canto CO_2 contiña orixinalmente a mesma masa de auga hai uns 250 anos no océano preindustrial, nese mesmo lugar e profundidade. Esta cantidade coñécese como *CO_2 preformado preindustrial* e calcúlase baixo certas hipóteses, como que a circulación oceánica e as proporcións bioxeoquímicas básicas (relacións de Redfield) non cambiaron de forma significativa co tempo. A estimación obtense mediante algoritmos de retrocálculo que combinan as medicións actuais de variables como a temperatura, a salinidade, a alcalinidade total, os nutrientes, o osíxeno e outros trazadores químicos presentes na mostra.

Pois ben, restando o CO_2 preformado actual co CO_2 preformado preindustrial obtense o CO_2 antropoxénico. E, se restamos o CO_2 antropoxénico ao CO_2 total medido na mostra, temos o CO_2 natural. Ambos os dous (CO_2 natural e antropoxénico) proporcionaron a Aida unha información moi valiosa, como veremos.

A separación do sinal antrópico é bastante enxeñosa, aínda que complicada, non só porque non pode ser medida directamente (só calculada por diferenzas) senón tamén porque é, como

moito, só un 3 % do sinal total, polo que hai que conseguir precisións e exactitudes analíticas moi elevadas nas medidas de todas as variables oceanográficas implicadas, coa complexidade engadida de estar nun laboratorio a bordo dun barco. Outra complicación adicional é que o carbono no océano está implicado nunha bioxeoquímica bastante complexa (involucrando a bomba biolóxica e a de carbonato, como vimos) que ten que ser subtraída ou descontada de forma precisa. Aida contribuíu en varios traballos a propoñer, comparar e refinar varias metodoloxías para a cuantificación do CO_2 antropoxénico (por exemplo, Pérez *et al.*, 2002; Vázquez-Rodríguez *et al.*, 2009; Ríos *et al.*, 2010; Vázquez-Rodríguez *et al.*, 2012; Castaño-Carrera *et al.*, 2012; Ríos *et al.*, 2012) que conteñen as ideas básicas que se expuxeron aquí e que contribuíron a que a comunidade científica pasase dun escepticismo inicial a unha aceptación xeneralizada (Khatiwala *et al.*, 2013).

Aínda así, estas metodoloxías non son completamente independentes entre si, xa que comparten en gran medida os mesmos datos oceanográficos de partida. Existe, non obstante, unha aproximación alternativa para separar o sinal de orixe humana do natural, que Aida explorou xunto con colegas franceses (Racapé *et al.*, 2013). Este enfoque baséase en analizar como cambia co tempo a composición isotópica do carbono 13 (^{13}C), o outro isótopo estable do carbono, moito menos abundante que o carbono 12 (^{12}C). A idea fundamental, coñecida como o efecto Suess, é que a vexetación primitiva que deu orixe aos combustibles fósiles incorporaba preferentemente ^{12}C durante a fotosíntese, porque ao ser máis lixeiro requiría menos enerxía que o ^{13}C. Como resultado, o carbono liberado hoxe pola queima de combustibles fósiles presenta unha firma isotópica característica que permite rastrexar a pegada antrópica no océano.

Esta diferenza na composición do carbono explica que, ao queimar hoxe en día carbón e petróleo, a atmosfera se vaia empobrecendo progresivamente en ^{13}C. Este mesmo cambio obsérvase tamén no océano, onde diminúe o ^{13}C ao mesmo tempo que aumenta o dióxido de carbono antrópico. Para comprobar esta relación, Racapé e os seus colaboradores compararon medicións realizadas no Atlántico Norte en 2006 con datos obtidos en 1981. Os resultados mostraron que a perda de ^{13}C nas augas oceánicas coincidía en gran medida, entre un 75 % e un 90 %, co aumento do carbono procedente de actividades humanas durante estes 25 anos.

Aida na cima: facendo inventario

A súa participación no traballo de 2004 na revista *Science* «The oceanic sink for anthropogenic CO_2» de Sabine *et al.* (o *paper* que recibiu o maior número de citas da historia do Instituto de Investigacións Mariñas de Vigo ata hoxe, máis de 3300) é froito dun enorme esforzo científico internacional para poñer por primeira vez á disposición da comunidade científica e da sociedade un inventario global de CO_2 antropoxénico nos océanos (figura 1), ademais da súa distribución en cada océano e para cada profundidade. O inventario é a cantidade total de CO_2 antropoxénico que hai en calquera «punto» do océano (de 1 m^2 área superficial) en toda a columna de auga. Mediante a integración de todos estes datos, púidose dar por primeira vez con fiabilidade a cantidade total de carbono que os océanos incorporaran no período industrial (ou *antropoceno,* por entón entre 1800 e 1994).

Esta enorme cantidade de carbono absorbido polo océano foi estimada en 118 ± 19 PgC (1 Pg son 10^{15} gramos) e púxose inmediatamente en contexto comparándoa con outras magnitudes ben coñecidas para o mesmo período histórico. Por un lado, as emisións á atmosfera procedentes da actividade industrial —principalmente a queima de combustibles fósiles e a produción de cemento— estimáronse en 244 ± 20 PgC. Por outro, a acumulación de carbono na atmosfera puido calcularse con bastante precisión a partir de medicións directas da concentración de CO_2, que aumentou de 281 a 359 partes por millón entre 1800 e 1994, o que equivale a unha acumulación de 165 ± 4 PgC, dous terzos das emisións industriais totais. Ao combinar estas tres cifras, Aida e os seus colaboradores puideron inferir de forma indirecta que os ecosistemas terrestres actuaron como unha fonte neta de carbono cara á atmosfera durante o Antropoceno, cunha contribución estimada de 39 ± 28 PgC, un resultado que por aquel entón non puido cuantificarse con tanta precisión. Dado que o contido de CO_2 antropoxénico no océano segue aumentando co tempo, os mesmos autores actualizaron esta estimación para o ano 2010 e obtiveron un valor de 155 ± 31 PgC (Khatiwala *et al.*, 2013), o que implica un incremento de 47 PgC en apenas 16 anos, a un ritmo próximo de 3 PgC por ano.

Polo seu liderado na determinación das variables do sistema do CO_2 durante numerosas campañas oceanográficas levadas a cabo nas décadas dos setenta, oitenta e noventa —entre

elas, GALICIAS I-XII, CITHER II e III, WOCE[1]-A5 ou VIVALDI (véxase, por exemplo, Ríos *et al.*, 1995; Ríos *et al.*, 2003)—, Aida foi a responsable dos datos correspondentes ao océano Atlántico nestes dous estudos. En particular, a campaña WOCE-A5, realizada en 1992 a bordo do recentemente estreado buque oceanográfico Hespérides, tivo un carácter especialmente simbólico, xa que reproduciu, 500 anos despois, a mesma ruta transoceánica seguida polas carabelas de Colón en 1492. Foi nesa ocasión cando tiven por primeira vez o privilexio de embarcarme con Aida para medir conxuntamente as variables do sistema do CO_2. Tras unha breve parada na Expo 92 de Sevilla, partimos desde Cádiz e perdemos de vista terra firme nas illas Canarias, para recuperala mes e medio máis tarde en Miami (Florida). Aquel final de campaña incluíu uns días de merecido descanso, pero a tranquilidade deu paso á angustia coa chegada do furacán Andrew, do que logramos escapar case de milagre, primeiro en coche ata Jacksonville e, posteriormente, nunha complexa cadea de voos que nos devolveu a Vigo dous días despois.

De todos os océanos, o Atlántico é o que máis concentración de CO_2 antropoxénico ten (particularmente na súa cunca norte, figura 1) debido ás particulares características da súa circulación xeral, que se exporán a continuación pola súa transcendencia.

Sube que te levo: a ruta do CO_2 antropoxénico no Atlántico

Os océanos absorben CO_2 antropoxénico por superficie, por estar ese gas practicamente en equilibrio cunha atmosfera rica en CO_2 antropoxénico. Como a mestura no océano é relativamente lenta considerando os seus grandes volumes de auga, é nas capas máis superficiais de todos os océanos onde se observan as maiores concentracións: a metade de todo o CO_2 antropoxénico atópase nos primeiros 400 m. Non obstante, o inventario no Atlántico Norte é 4-5 veces maior (ata 80 mol/m^2) que no resto de cuncas, debido á bomba de solubilidade, asociada á circulación termohalina, cuxo motor principal é o océano Atlántico. Denomínase bucle de circulación meridional do Atlántico (AMOC[2], polas súas siglas en inglés) e é unha circulación esencial para o sistema climático terrestre.

1 WOCE son as siglas de World Ocean Circulation Experiment, un ambicioso programa internacional de investigación oceánica cuxa fase de observación se levou a cabo durante a década dos 90.
2 AMOC son as siglas de Atlantic Meridional Overturning Circulation.

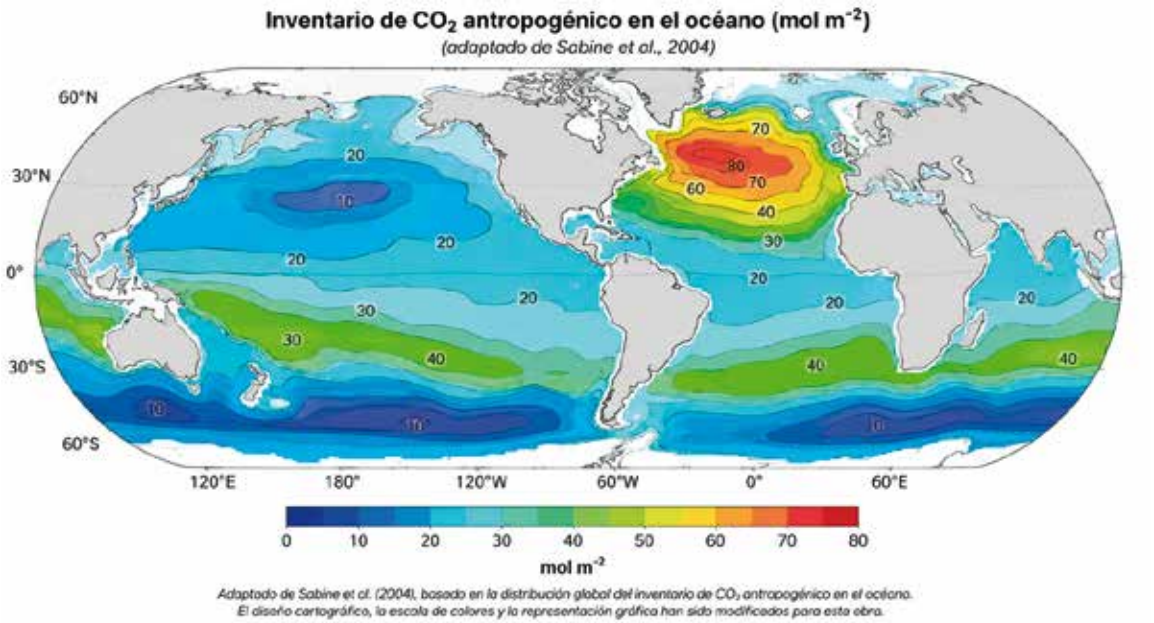


Figura 1. Distribución global do inventario de CO_2 antropoxénico no océano (mol·m^{-2}). O deseño cartográfico, a escala de cores e a representación gráfica foron modificados para esta obra a partir da figura 1 de Sabine *et al*. (2004). Destaca o enorme inventario do Atlántico e particularmente da súa cunca norte

Para explicar a AMOC debemos simplificar ao máximo o complexo sistema de correntes superficiais, a medias augas e profundas do Atlántico, e teriamos o seguinte esquema integrado en dúas capas: unha corrente superior cara ao norte (a rama cálida ou superior da AMOC, desde a superficie ata ~1100 m, cuxa principal contribución é a Corrente do Golfo), con alto CO_2 antropoxénico, e unha corrente en profundidade cara ao sur (rama fría ou inferior da AMOC, desde 1100 m ata o fondo) con baixo CO_2 antropoxénico. O momento crítico do bucle prodúcese ao chegar a corrente cálida ao Atlántico Norte (aos mares de Noruega, Groenlandia e Labrador), arrefriarse bruscamente nos crús invernos, densificarse, afundirse e volver en dirección contraria pero xa en profundidade. A masa de

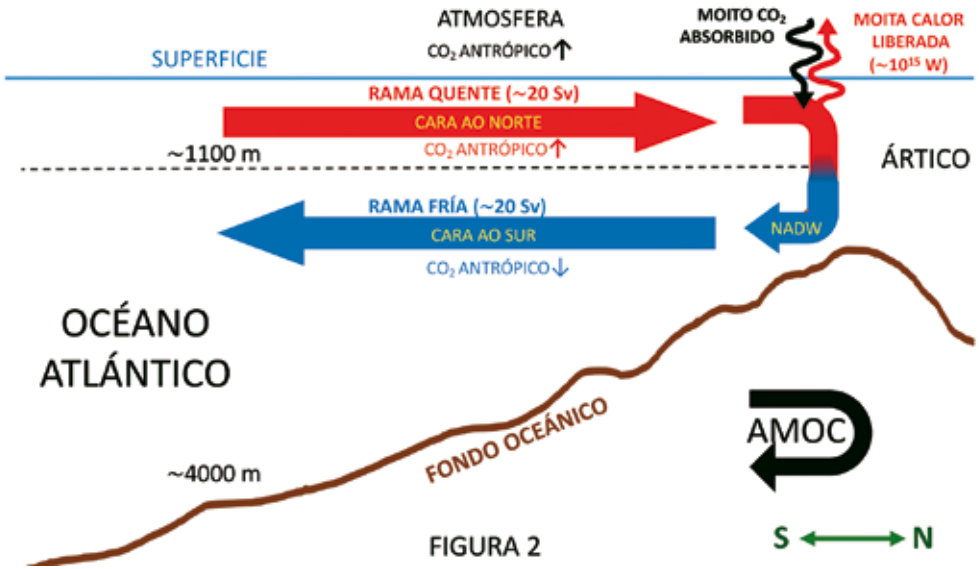


Figura 2. Representación esquemática do bucle de circulación meridional do Atlántico (AMOC)

auga que circula por esta rama fría coñécese de forma xeral como NADW[3] (polas siglas en inglés de Auga Profunda NorAtlántica). Ambas as ramas teñen unha diferenza de temperatura media duns 8 ºC e un caudal (ou transporte) enorme, duns 20 Sv[4] (figura 2). Esta circulación descrita é exclusiva do océano Atlántico, non sucede nin no Pacífico nin no Índico, xa que neles non se produce unha masa de auga equivalente ao NADW.

Como o NADW comeza a afundirse desde a superficie, onde o seu contido en CO_2 é moi alto, a formación do NADW implica o *secuestro* de CO_2 atmosférico cara a capas profundas, a escalas de tempo de centenares de anos. Isto significa que esa auga co CO_2 incorporado non volverá á superficie ata dentro de varios centos de anos. Como consecuencia da circulación en profundidade cara ao sur

3 NADW son as siglas de North Atlantic Deep Water.
4 Sv é a unidade de caudal equivalente a un millón de m^3/s, en honor ao oceanógrafo noruegués H. Sverdrup. 1 Sv é o caudal de auga aproximado de todos os ríos do mundo xuntos.

do NADW, toda a cunca Atlántica está afectada por altos contidos de CO_2 antropoxénico a profundidades medias (500-1500 m). Noutras palabras, mentres que no Índico e no Pacífico os niveis de carbono antropoxénico en profundidades medias son moi baixos, no Atlántico seguen sendo relativamente altos. No Atlántico aínda hai sinal antrópico ata os 3000 m mentres que no resto chega como moito ata os 1500 m.

Os transportes de CO_2 natural e antrópico ligados á AMOC foron obtidos por Aida e os seus colegas combinando (multiplicando) os transportes físicos de auga e as concentracións de CO_2 obtidos en campañas transoceánicas (desde a costa africana ou europea á costa americana). Os primeiros estudos utilizaron os campos físicos e químicos na xa comentada WOCE-A5 (Rosón *et al.*, 2003) e na WOCE-A25 (Vigo-Cabo Farewell, Groenlandia, Álvarez *et al.*, 2003). Como no Atlántico é esencialmente unha cunca cerrada polo norte (excepto un pequeno fluxo, coñecido, a través do estreito de Bering), é necesario que a sección da mostraxe sexa transoceánica para asegurar que non perdemos ningún fluxo lateral. Pero é más, combinando unha sección transoceánica con outra (situada máis ao norte ou máis ao sur), pódese realizar un balance entre elas e estimar o CO_2 (ambas as fraccións e o total) que se intercambia coa atmosfera na área superficial flanqueada por ambas as seccións.

Os resultados máis relevantes destes traballos amosan que o ciclo de CO_2 (tanto o natural como o total) no Atlántico está controlado pola circulación da AMOC: captación de CO_2 atmosférico ao norte do océano, transporte neto de CO_2 cara ao sur e emisión de CO_2 ao sur do océano. Isto é debido a que ambas as ramas da AMOC teñen practicamente o mesmo transporte (~20 Sv) pero as augas profundas teñen máis CO_2 natural e total que as superficiais. Non obstante, para a fracción antrópica a circulación é oposta: captación ao sur, transporte neto cara ao norte e acábase liberando á atmosfera no Atlántico Norte (con transportes de 1-2 ordes de magnitude menores que o natural e o total). Isto é debido a que as augas superficiais teñen máis CO_2 antrópico que as profundas. En conclusión, o ciclo do CO_2 antropoxénico debe entenderse como unha perturbación do ciclo natural.

Os transportes de auga necesarios para obter os resultados da campaña WOCE-A5 calculáronse a partir da análise do campo de densidade do océano, determinado mediante as medicións de salinidade, temperatura e presión realizadas nas 120 estacións que compoñían a sección. Estes cálculos foron responsabilidade da oceanógrafa física Alicia Lavín, íntima amiga de Aida e, naquel entón,

investigadora do Instituto Español de Oceanografía en Santander, onde máis tarde sería a directora do centro entre 2012 e 2020. Durante a campaña traballaramos ombro con ombro con ela e mantivemos unha excelente relación profesional e persoal. Por iso, en marzo de 1998, Aida e eu viaxamos a Santander para integrar a información química e física e avanzar xuntos na análise dos datos. Voamos primeiro a Bilbao e aproveitamos para visitar o recentemente inaugurado Museo Guggenheim. Á saída, Aida, con fame tras a visita, non dubidou en subir rapidamente a un taxi que esperaba detido nun semáforo.

- Lévenos onde poñan o mellor bacallau ao pilpil de Bilbao.

A verdade é que estaba moi rico, pero fíxome pasar unha mala noite… En Santander, Alicia acolleunos esplendidamente de día e fíxonos de divertida cicerone de noite. Ata nos levou a Pachá!

Outra ruta especialmente interesante para o transporte de CO_2 que investigou Aida, combinando datos de circulación oceánica e concentracións de carbono, é o estreito de Xibraltar, que conecta o océano Atlántico co mar Mediterráneo. Nesta rexión establécese unha circulación xeral en dúas capas ben diferenciadas. A capa superior, que se estende aproximadamente desde a superficie ata os 200 metros de profundidade, está formada por augas relativamente cálidas e pouco salinas, con baixo contido de CO_2 natural e alto contido de CO_2 antropoxénico, e flúe cara ao Mediterráneo cun caudal medio de 0,89 Sv. Por debaixo, a capa inferior, máis fría e salina, rica en CO_2 natural e pobre en CO_2 antropoxénico, retorna cara ao Atlántico cun transporte próximo a 0,85 Sv. A lixeira diferenza entre ambos os fluxos, de arredor de 0,04 Sverdrups, débese fundamentalmente á elevada evaporación que ten lugar no Mediterráneo, o que explica que esta cunca importe calor e exporte sal de forma neta a través do Estreito. Non obstante, ao incorporar a información adicional sobre as fraccións natural e antropoxénica do CO_2 obtida por Aida a partir de nove campañas realizadas no Estreito entre 2005 e 2007 —lideradas por Emma Huertas, oceanógrafa química do Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAN-CSIC) e tamén colaboradora próxima—, constatouse que o Mediterráneo actúa como exportador neto de CO_2 natural, cun fluxo estimado de 25 TgC/ano ($1Tg=10^{12}g$), pero como importador neto de CO_2 antropoxénico, arredor de 4,2 TgC/ano. Ao igual que sucede no caso da AMOC, ambas as fraccións seguen rutas opostas, o que constitúe outra evi-

dencia máis de que a circulación do CO_2 antropoxénico representa unha perturbación relativamente pequena superposta ao ciclo natural do carbono oceánico (Huertas *et al.*, 2009).

Aida facendo provisión: taxas de almacenamento de CO_2 antrópico

Cando Aida naceu, en 1947, o océano xa almacenara arredor de 40 PgC de orixe antropoxénica. Cando se incorporou ao Instituto de Investigaciones Pesqueras de Vigo en 1972, esa cantidade duplicárase ata alcanzar os 80 PgC, e cando ingresou na Real Academia Galega de Ciencias, en 2015, cuadriplicárase e superaba os 160 PgC. Esta evolución amosa con claridade que a acumulación de CO_2 antropoxénico no océano seguiu un crecemento practicamente exponencial, impulsado polo ritmo acelerado da queima de combustibles fósiles. Na actualidade, o océano incorpora carbono antropoxénico a unha taxa global próxima a 3 PgC por ano, equivalente a uns 0,7 moles de carbono por metro cadrado e ano. A maior parte deste carbono, aproximadamente o 90 %, almacénase en forma de ión bicarbonato (HCO_3^-), que é a especie química máis abundante e estable.

A taxa de almacenamento é diferente en cada cunca e rexión oceánicas. A particular circulación xeral do Atlántico antes descrita provoca que, tendo só un 29 % da superficie total dos océanos, almacene ata o 38 % do carbono antropoxénico total (Ríos *et al.*, 2012). Como o Atlántico é a zona de maior inventario, Aida intuíu que este océano é o que debería ter a taxa de almacenamento máis alta. A súa cuantificación consíguese facendo o enorme esforzo de repetir campañas oceanográficas cada poucos anos na mesma zona xeográfica e comparar os seus inventarios. Como valiosos exemplos achegados por Aida e o seu equipo, para o Mar de Irminger, Pérez *et al.* (2008) compararon resultados de 6 campañas entre 1981 e 2006 e resultou unha taxa media de 1,1±0,1 molC/m^2/ano, aínda que con picos durante os primeiros anos 90 de 2,3±0,6 molC/m^2/ano. Para a cunca ibérica (1993-2009, 4 campañas), 1,5±0,2 molC/m^2/ano (Fajar *et al.*, 2012). Para o Atlántico ecuatorial (1993-2010, 2 campañas), entre 0.8±0.2 e 1,0±0,2 molC/m^2/ano (dependendo do método de separación empregado, Fajar *et al.*, 2015). Para a rexión dos Azores (4 campañas entre 1991 e 2004, Pérez *et al.*, 2010), 1,25±0,20 molC/m^2/ano. Para o Atlántico subpolar

(5 campañas OVIDE[5] entre 2002 e 2010), 1,3±0,3 molC/m^2/ano (Zunino *et al.*, 2015a). En todos os casos se obtén unha maior taxa de almacenamento que a global (0,7 molC/m^2/ano).

Ten especial relevancia o estudo que Aida liderou no Atlántico suroeste. Cun conxunto de 20 campañas realizadas entre 1972 e 2003, obtivo unha taxa de almacenamento de 0,9±0,1 molC/m^2/ano (Ríos *et al.*, 2012). Desta cantidade, aproximadamente un 22% (0,2 molC/m^2/ano) corresponde á contribución doutra masa de auga de importancia global: a auga de fondo antártica (AABW[6]), que ocupa un gran volume nesta rexión por debaixo dos 4000 m de profundidade. O seu sinal antrópico é moi reducido, xa que unha parte desta masa de auga abandonou a superficie nos inicios da Revolución Industrial. Aínda así, a alta sensibilidade dos métodos de separación do CO_2 antropoxénico que Aida perfeccionou permitiu cuantificar a súa contribución.

A grande ameaza: o talón de Aquiles da AMOC

A principal característica que causa a AMOC no clima de Europa é que, durante o proceso de afundimento do NADW, o océano libera unha cantidade xigantesca de calor cara á atmosfera, que Aida e os seus colaboradores cuantificaron en Álvarez *et al.* (2002 e 2004) en $0{,}7 \cdot 10^{15}$ watts. Esta calor liberada é a que a AMOC transporta netamente cara ao norte (o mesmo esquema que o CO_2 antrópico, como vimos) e mantén os invernos no norte de Europa con temperaturas relativamente suaves (entre 5 e 10 ºC máis quentes que se a AMOC non existise).

No contexto actual de cambio climático, é unha evidencia que os xeos continentais de Groenlandia se están a derreter (IPCC, 2023). Esta adición extra de auga doce ao océano Atlántico Norte (xusto na zona de afundimento do NADW) crea unha capa superficial pouco salina e estable. A estratificación adicional actúa como unha enérxica barreira física, que contrarresta e dificulta a densificación e o afundimento por convección invernal da rama fría. En consecuencia, a AMOC está reducindo a súa intensidade.

Os estudos máis recentes, baseados tanto en medicións directas da intensidade da AMOC —cuxo transporte de media rolda os 20 Sv— como en simulacións realizadas con modelos climáticos

5 OVIDE son as siglas de Observatoire de la Variabilité Interannuelle et Décennale en Atlantique Nord, proxecto conxunto de catro institucións de investigacións francesas, entre elas o Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER).
6 AABW son as siglas de Antarctic Bottom Water.

globais, coinciden en sinalar que esta circulación iniciou un proceso de ralentización. Este enfraquecemento chegou a amosar mínimos preocupantes, como os rexistrados en 2009-2010, cando o transporte descendeu ata valores próximos aos 10 Sv. Nesta liña, o último informe do IPCC (2023) indica cun alto grao de fiabilidade que é bastante probable que a intensidade da AMOC continúe diminuíndo, polo menos durante o resto do século XXI.

Ademais, os rexistros paleoclimáticos conservados no subsolo oceánico demostran que no pasado xa se produciron reducións significativas e incluso colapsos abruptos da AMOC, a escalas temporais de décadas. Un dos episodios máis coñecidos é o evento do Younger Dryas, acontecido hai uns 13 000 anos, cando a liberación rápida e masiva de grandes volumes de auga doce procedentes do desxeo do manto continental Lauréntida —que cubría gran parte do que hoxe é o leste dos Estados Unidos e O Canadá— alterou profundamente a circulación do Atlántico. A principal diferenza coa situación actual é que aquel evento respondeu a causas naturais, como cambios na radiación solar.

O enfraquecemento da AMOC pode ter consecuencias climáticas moi importantes. Se o océano non libera de forma eficiente o enorme fluxo de calor cara á atmosfera durante a transformación da rama cálida na rama fría, os invernos en Europa poderían volverse moito máis severos, con descensos de temperatura estimados entre 5 e 10 °C en ausencia desta circulación. Desde unha perspectiva global, este proceso pode interpretarse como unha retroalimentación negativa do sistema climático: ante unha anomalía térmica positiva asociada ao cambio climático, o sistema responde xerando unha anomalía térmica negativa, en forma de arrefriamento rexional ligado ao enfraquecemento da AMOC (figura 3).

Pero as implicacións non terminan aí e é aquí onde Aida volve situarse no centro do avance científico. Os seus traballos demostraron que a desaceleración da AMOC tamén está reducindo a capacidade do Atlántico para absorber CO_2 da atmosfera. A partir da análise de trece campañas realizadas no Atlántico Norte entre 1990 e 2006, Aida e os seus colaboradores observaron que esta diminución na captación de CO_2 está estreitamente relacionada cunha menor liberación de calor do océano cara á atmosfera. Este comportamento é coherente cunhas augas superficiais progresivamente máis cálidas, que teñen menor capacidade para disolver CO_2, xa que a súa solubilidade di-

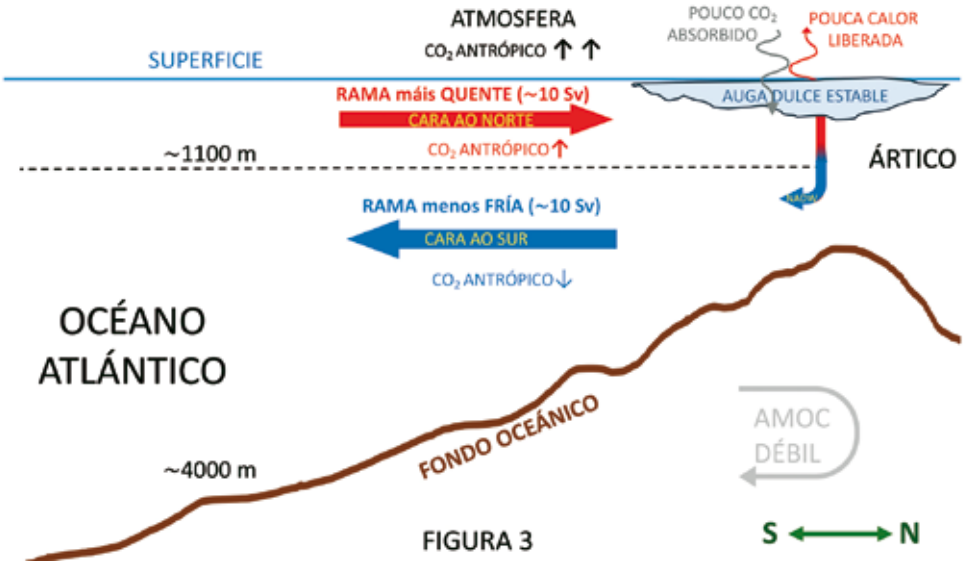


Figura 3. Representación esquemática do enfraquecemento do bucle de circulación meridional do Atlántico (AMOC). Compárese coa figura 2

minúe ao aumentar a temperatura, un mecanismo directamente asociado á bomba de solubilidade. Como consecuencia, durante ese período detectouse un descenso na taxa de almacenamento de CO_2 antropoxénico nas augas subpolares do Atlántico Norte (Pérez *et al.*, 2013).

A mensaxe clave que Aida e os seus colegas puxeron de manifesto neste traballo, publicado nunha revista do grupo editorial Nature, é que o enfraquecemento da AMOC está limitando a capacidade do océano para absorber o exceso de CO_2 atmosférico xerado pola actividade humana. Se o océano perde parte dese potencial amortecedor, unha maior fracción do CO_2 permanecerá na atmosfera e intensificará o cambio climático. Trátase, por tanto, dun claro exemplo de retroalimentación positiva do sistema climático.

O reto que se formula agora é particularmente complexo: se a concentración de CO_2 antropoxénico no Atlántico Norte continúa aumentando, pero os transportes de CO_2 asociados á circula-

ción se debilitan como consecuencia da ralentización da AMOC, como evolucionará a taxa de almacenamento de carbono antropoxénico nesta rexión ao longo do século XXI? O traballo de Zunino *et al.* (2014), baseado en seis campañas OVIDE repetidas no Atlántico subpolar entre 1997 e 2010, suxire que a AMOC controla a variabilidade dos transportes de CO_2 antropoxénico a escalas de tempo interanuais e decenais, mentres que o aumento progresivo da súa concentración domina a evolución a escalas seculares. Por iso, a pesar da desaceleración prevista da circulación durante este século, cabería esperar un incremento neto da taxa de almacenamento de CO_2 antropoxénico no Atlántico subpolar. Máis ao sur, no Atlántico tropical —entre 7° e 24° N—, Zunino *et al.* (2015b) encontraron igualmente un aumento dos transportes de CO_2 antropoxénico impulsado polo crecemento da súa concentración, aínda que parcialmente compensado polo enfraquecemento da circulación, xunto cunha notable acumulación de carbono antropoxénico na rexión.

En conclusión, o legado que deixou Aida nestes estudos é que os transportes no Atlántico, tanto de CO_2 antrópico como de CO_2 natural, están ambos os dous determinados polo transporte físico de auga, exceptuando a tendencia decenal dos transportes de CO_2 antrópico, que está influenciada principalmente por cambios na súa crecente concentración.

Epílogo

En 2010 Aida aceptou formar parte do tribunal da oposición da miña cátedra na Universidade de Vigo. Como mostra de «agradecemento», en setembro de 2011 propúxena para que formase parte da Comisión Executiva de Docencia e Captación de Talento e da Comisión Académica do Programa de Doutoramento do Mar, ambas as dúas no ámbito do Campus do Mar[7], a primeira delas dirixida pola miña compañeira na facultade Elsa Vázquez, catedrática de Zooloxía. A pesar de que as tarefas de dirección do IIM lle consumían bastante tempo, aceptou encantada, e conxeniou moi ben con todos os membros das comisións e particularmente con Elsa, durante as comidas e sobremesas posteriores ás reunións. Vaia fichaxe!

7 O Campus do Mar é un Campus de Excelencia Internacional que agrupa universidades galegas e portuguesas, centros de investigación e entidades públicas e privadas para investigar todo o relacionado co ámbito mariño.

Por esta época, quedabamos máis para comer e falar un pouco de todo que nos despachos ou reunións. A Aida e a Fiz gustáballes o menú e a proximidade do acolledor sitio en Bouzas «La Carpintería» e alí gozabamos de agradables sobremesas. Cara a finais de 2015 tivemos unha desas comidas e ao rematar despedinme dela esperando vela axiña.

El océano no olvida
a quienes aprendieron su lenguaje.

Tú leías mareas como otros leen cartas,
nombrabas corrientes invisibles
y descendías al azul
con la serenidad de quien comprende.

Pero no fue el mar quien te llamó aquella vez.

Fue una curva,
un instante de vidrio metal,
la interrupción abrupta del camino
bajo un cielo que aún guardaba sal.

En Galicia,
la lluvia siguió cayendo sobre la costa,
y el viento, antiguo testigo,
llevó tu nombre hacia el horizonte.

El océano esperó.

Porque tú supiste medir su pulso,
escuchar su respiración profunda,
traducir su misterio
para quienes nunca se atrevieron a mirarlo de cerca.

Y ahora, aunque no te tenga,
te guarda.

En cada marea que asciende
persiste algo de tu mirada,
en cada corriente que avanza en silencio
pervive tu legado.

El océano no devuelve
a quienes lo entendieron.

Los transforma en memoria,
en conocimiento,
en una presencia constante
que Galicia reconoce
cada vez que el mar respira.

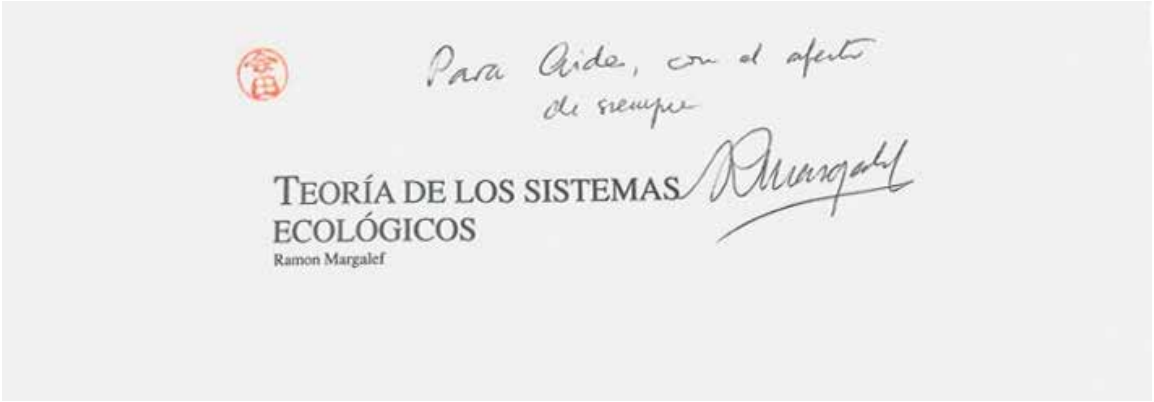
Festexando a chegada a Miami despois da WOCE-A5 (agosto de 1992). Desde a dereita, Alicia Lavín (IEO-Santander), Enrique Fanjul (Puertos del Estado, Madrid), Alan Cantos (Asociación de Ingeniería de Consultores, AINCO), Aida e o autor.
O furacán Andrew xa estaba chegando a Miami pero, como é obvio, nin nos decatamos

Catro rapaces case ou recentemente doutorados: Aida, Carmen González Castro (IIM-Vigo), o autor e Xosé Antón Álvarez Salgado (IIM-Vigo), durante a fin de ano de 1993 en Pocitos (Montevideo, O Uruguai), antes da eterna campaña CITHER II (WOCE-A17) no Atlántico suroeste (B/O Maurice Ewing, 1994), pasar por un entroido de tolos en Salvador de Baía (O Brasil) e rematar, xa na Pascua, na illa de Martinica e en Porto Rico

Revisitando a Campaña de COLÓN de 1992. Desde a dereita, Enrique Fanjul (Puertos del Estado, Madrid), Aida, Gregorio Parrilla (xefe de campaña, IEO-Madrid) e o autor. Tribunal da tese de César González Pola, dirixida por Alicia Lavín (Xixón, xuño de 2006)

Aida orgullosa do seu equipazo feminino, uniformadas coa camiseta que ela deseñou para a ocasión, na cuberta do B/O Sarmiento de Gamboa durante a campaña CATARINA 2012. Desde a esquerda, Maribel García (IIM), Lidia Carracedo (IIM), Aida, Meche de la Paz (IIM), Alba Marina Cobo (IIM), Noelia Fajar (IIM), Pascale Lheminier (IFREMER-Brest), Verena Rumpel (Univ. de Bremen), Nadine Broda (Univ. de Bremen), Mónica Castaño (IIM) e Vanessa (tripulación, máquina). Faltan a primeira oficial de ponte (Ánxeles Campos) e a cociñeira (Paqui), que estaban de garda

Aida en modo larpeira, recentemente desembarcada como xefa da campaña CATARINA (Vigo-St. John's, O Canadá, B/O Sarmiento de Gamboa) (Terranova, xullo de 2012)



Aida ás costas de xigantes. Cando Aida nos deixou, unha parte da biblioteca do seu despacho caeu nas miñas mans (grazas, Fiz), polo que puiden confirmar a súa sólida cultura científica e xeral.
Todos os seus libros tiñan o cuño personalizado adxunto, que significa *Aida* en idioma chinés. Este é un exemplo, cunha cariñosa dedicatoria do célebre profesor Ramón Margalef (1919-2004), catedrático de Ecoloxía da Universitat de Barcelona e gran colega do director de tese de Aida, o eminente oceanógrafo e académico da RAGC desde 1987 Fernando Fraga (1922-2020)

Referencias bibliográficas

Álvarez M., Bryden H.L., Pérez F.F., Ríos A.F., Rosón G. (2002). Physical and biogeochemical fluxes and net budgets in the subpolar and temperate North Atlantic. Journal of Marine Research, 60 (2), 191-226.

Álvarez M., Ríos A.F., Pérez F.F., Bryden H.L., Rosón G. (2003). Transports and budgets of total inorganic carbon in the subpolar and temperate North Atlantic. Global Biogeochemical Cycles, 17 (1), 1-21.

Álvarez M., Pérez F.F., Bryden H., Ríos A.F. (2004). Physical and biogeochemical transports structure in the North Atlantic subpolar gyre. Journal of Geophysical Research: Oceans, 109 (3), C03027, 1-21.

Castaño-Carrera M., Pardo P.C., Álvarez M., Lavín A., Rodríguez C., Carballo R., Ríos A.F., Pérez F.F. (2012). Anthropogenic carbon and water masses in the bay of Biscay [Carbono antropogénico y masas de agua en el golfo de Vizcaya]. Ciencias Marinas, 38 (1B), 191-207.

Fajar N.M., Pardo P.C., Carracedo L., Vázquez-Rodríguez M., Ríos A.F., Pérez F.F. (2012). Trends of anthropogenic CO_2 along 20° W in the Iberian Basin. Ciencias Marinas, 38 (1 B), 287-306.

Fajar N.M., Guallart E.F., Steinfeldt R., Ríos A.F., Pelegrí J.L., Pelejero C., Calvo E., Pérez F.F. (2015). Anthropogenic CO_2 changes in the Equatorial Atlantic Ocean. Progress in Oceanography, 134, 256-270.

Huertas I.E., Ríos A.F., García-Lafuente J., Makaoui A., Rodríguez-Gálvez S., Sánchez-Román A., Orbi A., Ruíz J., Pérez F.F. (2009). Anthropogenic and natural CO_2 exchange through the strait of Gibraltar. Biogeosciences, 6 (4), 647-662.

IPCC (2023). Sections. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 35-115. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

Khatiwala S., Tanhua T., Mikaloff Fletcher S., Gerber M., Doney S.C., Graven H. D., Gruber N., McKinley G. A., Murata A., Ríos A.F., Sabine C.L. (2013). Global Ocean storage of anthropogenic carbon. Biogeosciences, 10 (4), 2169-2191.

Pérez F.F., Álvarez M., Ríos A.F. (2002). Improvements on the back calculation technique for estimating anthropogenic CO_2. Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 49 (5), 859-875.

Pérez F.F., Vázquez-Rodríguez M., Louarn E., Padín X.A., Mercier H., Ríos A.F. (2008). Temporal variability of the anthropogenic CO_2 storage in the Irminger Sea. Biogeosciences, 5 (6), 1669-1679.

Pérez F.F., Arístegui J., Vázquez-Rodríguez M., Ríos A.F. (2010). Anthropogenic CO_2 in the Azores region. Scientia Marina, 74 (Suppl. 1), 11-19.

Pérez F.F., Mercier H., Vázquez-Rodríguez M., Lherminier P., Velo A., Pardo P.C., Rosón G., Ríos A.F. (2013). Atlantic Ocean CO_2 uptake reduced by weakening of the meridional overturning circulation. Nature Geoscience, 6 (2), 146-152.

Racapé V., Pierre C., Metzl N., Lo Monaco C., Reverdin G., Olsen A., Morin P., Vázquez-Rodríguez M., Ríos A.F., Pérez F.F. (2013). Anthropogenic carbon changes in the Irminger Basin (1981-2006): Coupling δ13CDIC and DIC observations. Journal of Marine Systems, 126, 24-32.

Ríos A.F., Anderson T.R., Pérez F.F. (1995). The carbonic system distribution and fluxes in the NE Atlantic during Spring 1991. Progress in Oceanography, 35 (4), 295-314.

Ríos A.F., Álvarez-Salgado X.A., Pérez F.F., Bingler L.S., Arístegui J., Mémery L. (2003). Carbon dioxide along WOCE line A14: Water masses characterization and anthropogenic entry. Journal of Geophysical Research: Oceans, 108 (4), 3123, 1-16.

Ríos A.F., Vázquez-Rodríguez M., Padín X.A., Pérez F.F. (2010). Anthropogenic carbon dioxide in the South Atlantic western basin. Journal of Marine Systems, 83 (1-2), 38-44.

Ríos A.F., Velo A., Pardo P.C., Hoppema M., Pérez F.F. (2012). An update of anthropogenic CO_2 storage rates in the western South Atlantic basin and the role of Antarctic Bottom Water. Journal of Marine Systems, 94, 197-203.

Rosón G., Ríos A.F., Pérez F.F., Lavín A., Bryden H.L. (2003). Carbon distribution, fluxes, and budgets in the subtropical North Atlantic Ocean (24.5°N). Journal of Geophysical Research: Oceans, 108 (5), 3144, 1-14.

Sabine C.L., Feely R. A., Gruber N., Key R. M., Lee K., Bullister J.L., Wanninkhof R., Wong C.S., Wallace D.W.R., Tilbrook B., Millero F.J., Peng T.-H., Kozyr A., Ono T., Ríos A.F. (2004). The oceanic sink for anthropogenic CO_2. Science, 305 (5682), 367-371.

Vázquez-Rodríguez M., Touratier F., Monaco C.L., Waugh D.W., Padín X.A., Bellerby R.G.J., Goyet C., Metzl N., Ríos A.F., Pérez F.F. (2009). Anthropogenic carbon distributions in the Atlantic Ocean: Data-based estimates from the Arctic to the Antarctic. Biogeosciences, 6 (3), 439-451.

Vázquez-Rodríguez M., Pérez F.F., Velo A., Ríos A.F., Mercier H. (2012). Observed acidification trends in North Atlantic water masses. Biogeosciences, 9 (12), 5217-5230.

Zunino P., García-Ibáñez M. I., Lherminier P., Mercier H., Ríos A.F., Pérez F.F. (2014). Variability of the transport of anthropogenic CO_2 at the Greenland-Portugal OVIDE section: Controlling mechanisms. Biogeosciences, 11 (8), 2375-2389.

Zunino P., Lherminier P., Mercier H., Padín. X.A., Ríos A.F., Pérez F.F. (2015a). Dissolved inorganic carbon budgets in the eastern subpolar North Atlantic in the 2000s from in situ data. Geophysical Research Letters, 42 (22), 9853-9861.

Zunino P., Pérez F.F., Fajar N.M., Guallart E.F., Ríos A.F., Pelegrí J.L., Hernández-Guerra A. (2015b). Transports and budgets of anthropogenic CO_2 in the tropical North Atlantic in 1992-1993 and 2010-2011. Global Biogeochemical Cycles, 29 (7), 1075-1091.

A acidificación do océano: observar e comprender o cambio

Maribel I. García-Ibáñez
Científica titular no Centro Oceanográfico de Baleares (COB-IEO), CSIC
Membro do comité científico do International Ocean Carbon Coordination Project (IOCCP)

1. A acidificación oceánica, o outro problema do CO_2

O océano constitúe o maior reservorio activo de carbono do sistema terrestre. Contén aproximadamente 44 veces máis carbono que a atmosfera e, a escalas de tempo humanas, intercambia grandes cantidades de carbono con ela. Na actualidade, absorbe arredor dunha cuarta parte do dióxido de carbono (CO_2) emitido polas actividades humanas (CO_2 antropoxénico) (Friedlingstein *et al.*, 2026). Grazas a este proceso, o océano actúa como un dos grandes reguladores do clima da Terra e diminúe a velocidade do quecemento global. Porén, este papel mitigador tamén ten unha consecuencia menos visible: está modificando a química do océano.

O CO_2 é un gas particular: non só se disolve na auga do mar, senón que, ademais, reacciona con ela, o que desencadea unha serie de equilibrios químicos (Zeebe e Wolf-Gladrow, 2001) coñecidos como o sistema do CO_2 na auga do mar ou o sistema do carbonato na auga do mar (figura 1). Cando o CO_2 reacciona coa auga do mar forma un ácido débil, o ácido carbónico, que axiña se disocia en ións hidróxeno e bicarbonato. Este proceso causa unha diminución do pH da auga do mar. Asemade, o sistema está atenuado en parte pola presenza de ións carbonato, que reaccionan cos ións hidróxeno, de forma que a magnitude do cambio de pH se reduce. Por iso, ao se disolver CO_2 na auga de mar, non só diminúe o pH, senón tamén a concentración de ións carbonato na auga do mar. Malia que o océano segue a ser lixeiramente básico, esta redución progresiva do pH, derivada da captación oceánica do CO_2 antropoxénico, coñécese como acidificación oceánica.

Desde o inicio da Revolución Industrial, o pH medio da superficie oceánica diminuíu entre 0,1 e 0,2 unidades, e pasou de valores próximos a 8,2 a valores inferiores a 8,1 (IPCC, 2021). Este cambio corresponde a un aumento de arredor do 30 % na concentración de ións hidróxeno, isto é, na acidez da auga. As observacións dispoñibles, xunto con simulacións de modelos climáticos, indican

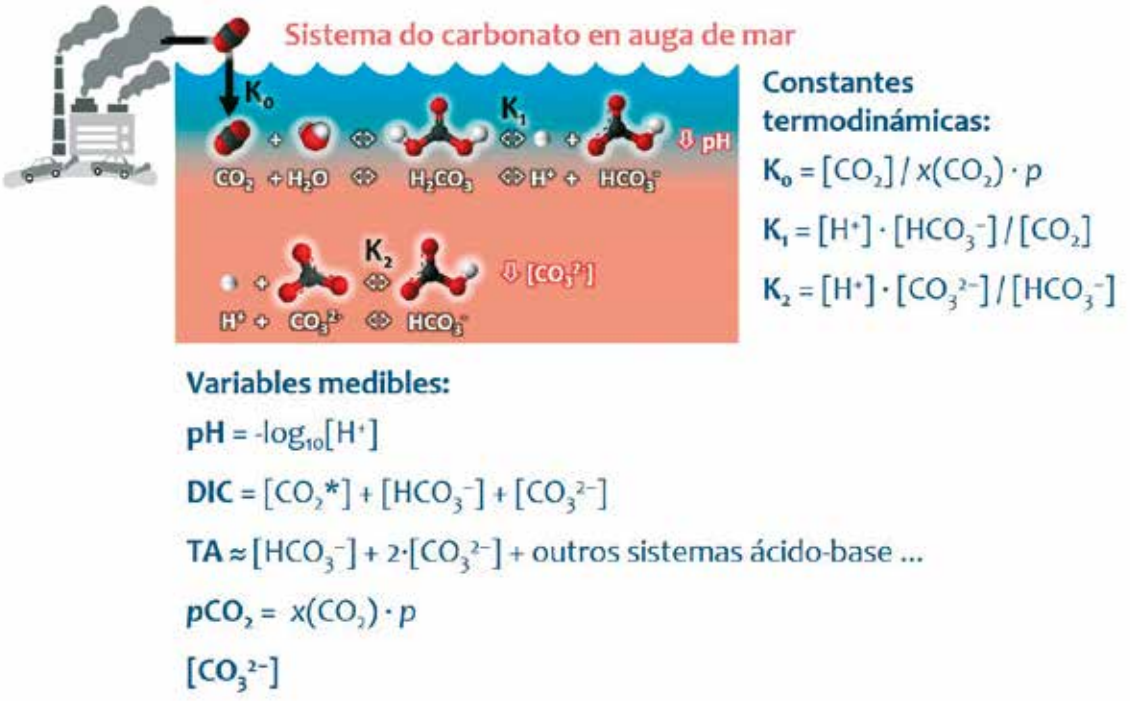


Figura 1. Diagrama sobre o sistema do carbonato na auga do mar que amosa as principais especies químicas que o compoñen —dióxido de carbono (CO_2), ácido carbónico (H_2CO_3) e ións bicarbonato (HCO_3^-) e carbonato (CO_3^{2-})—, as constantes termodinámicas que regulan o sistema —K_0, K_1 e K_2— e as variables medibles do sistema —pH ($pH = -\log_{10}[H^+]$), presión parcial de CO_2 (pCO_2, unha medida do CO_2 disolto en auga de mar), alcalinidade total (TA, unha medida da capacidade tampón da auga do mar) e carbono inorgánico disolto total (DIC, a suma das concentracións de todas as especies de carbono inorgánico)—

que esta tendencia continuará ao longo do século XXI se non se reducen de forma significativa as emisións de CO_2 (figura 2).

Xa que logo, a acidificación oceánica supón un dos cambios globais máis relevantes que está a experimentar o sistema oceánico. A diferenza do quecemento, que ten efectos máis evidentes, a acidificación oceánica é un proceso «silencioso», pero con consecuencias que poden ser profundas.

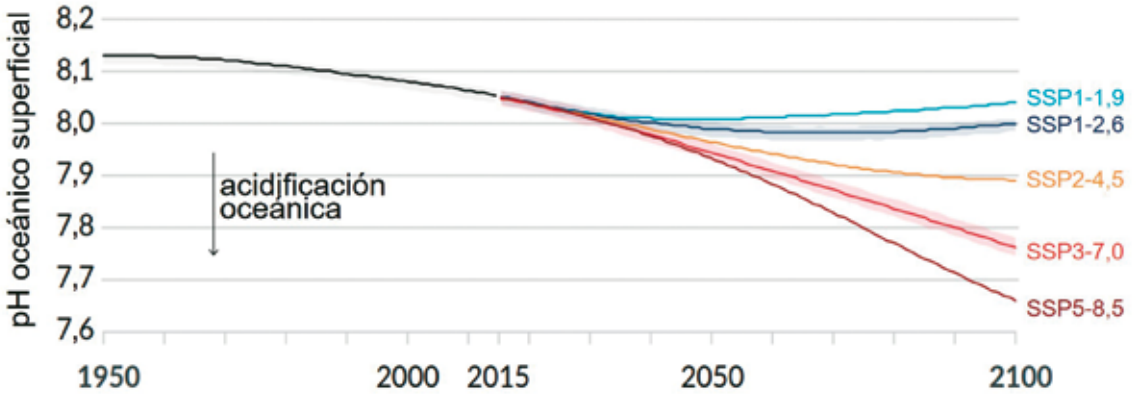


Figura 2. Gráfico que ilustra os cambios observados no pH superficial do océano (liña negra) e as proxeccións futuras baixo distintos escenarios de emisións futuras. As bandas de cor representan a incerteza asociada a cada escenario [adaptado de IPCC WGI (2021)]

Entre elas destacan os impactos sobre organismos calcificadores (aqueles que forman estruturas calcarias) como corais, moluscos ou determinados grupos de plancto, cuxa capacidade para formaren estruturas de carbonato cálcico pode verse comprometida pola acidificación oceánica (Riebesell *et al.*, 2000; Kroeker *et al.*, 2013; Mostofa *et al.*, 2016; Doney *et al.*, 2020).

A relevancia da acidificación oceánica levou a considerala un dos chamados límites planetarios, isto é, un dos procesos do sistema Terra cuxa alteración pode comprometer a súa estabilidade (Rockström *et al.*, 2009). Ademais, estudos recentes indican que este límite podería estar xa superado a escala global (Findlay *et al.*, 2025), o que pon de manifesto a magnitude do impacto humano sobre o océano.

Detectar e cuantificar estes cambios non é, porén, unha tarefa doada. As alteracións de pH asociadas á acidificación oceánica son relativamente pequenas en comparación coa variabilidade natural do océano, o que esixe medidas exactas, precisas e comparables no tempo e entre distintos grupos de investigación. Isto implica non só dispor de técnicas analíticas de alta calidade, senón tamén garantir a coherencia entre observacións realizadas en diferentes rexións e momentos, ademais de contar con series temporais que se estendan durante períodos longos de tempo.

Por iso, nas últimas décadas desenvolvéronse programas internacionais de observación orientados a medir con exactitude e precisión as variables do sistema do carbonato na auga do mar, así como a seguir a súa evolución ao longo do tempo. Estas iniciativas combinan campañas oceanográficas, estacións de medida continuas e redes globais de observación que xeran bases de datos de gran calidade que permiten detectar tendencias a longo prazo e comprender os procesos que controlan a distribución do CO_2 no océano.

Neste contexto, a investigación levada a cabo pola oceanógrafa galega Aida Fernández Ríos contribuíu a mellorar o noso coñecemento sobre a evolución da química do carbonato e mais a consolidar bases de datos que hoxe son unha referencia para o estudo da acidificación oceánica. Ao longo da súa carreira, Fernández Ríos participou activamente e liderou campañas oceanográficas e proxectos de investigación centrados na recompilación e na análise de datos de alta calidade.

Neste capítulo revísanse algunhas desas contribucións científicas ao estudo da acidificación oceánica e, a través de diferentes investigacións, amósase como as observacións oceanográficas e a colaboración internacional permitiron avanzar na comprensión dun dos procesos máis relevantes que afectan na actualidade ao océano global.

2. Detectar cambios sutís na química do océano

Un dos maiores retos no estudo da acidificación oceánica consiste en detectar cambios moi pequenos nun sistema extremadamente variable. O océano é dinámico por natureza: as correntes transportan augas con historias diferentes, a actividade biolóxica modifica decontino as concentracións de CO_2 e os intercambios coa atmosfera alteran a composición química das augas superficiais. Neste contexto, identificar tendencias de acidificación oceánica require medidas moi exactas e precisas, así como observacións sostidas ao longo do tempo.

Seguir o incremento do reservorio oceánico de CO_2 antropoxénico e as súas consecuencias —isto é, a acidificación oceánica— require monitorizar o sistema do carbonato na auga do mar, que consta de seis parámetros fundamentais en equilibrio termodinámico: as concentracións de CO_2 e de ións hidróxeno, bicarbonato e carbonato, o carbono inorgánico disolto total e a alcalinidade to-

tal. Destes parámetros, os que se poden determinar de forma analítica son: a concentración de ións hidróxeno a través do pH ($pH = -\log_{10}[H^+]$), a presión parcial de CO_2 (pCO_2, que cuantifica a presión xerada polo CO_2 disolto na auga do mar e que se pode usar como unha medida de canto CO_2 hai na auga), a alcalinidade total (TA, que se compón principalmente da alcalinidade de carbonatos, isto é, bicarbonato e carbonato, con contribucións doutros sistemas ácido-base, e que indica a capacidade da auga do mar para manter estable o seu pH a medida que aumenta a concentración de CO_2) e o carbono inorgánico disolto total (DIC, que cuantifica todas as formas de carbono inorgánico disolto do sistema do carbonato na auga do mar —isto é, CO_2, bicarbonato e carbonato—) (figura 1). Ademais, tamén coñecemos as constantes termodinámicas do sistema, que relacionan unhas variables con outras e que nos permiten determinar a química do carbonato na auga do mar con tan só medir dúas das variables; é dicir, podemos calcular todos os parámetros do sistema medindo unicamente dúas das súas variables.

Entre todas estas medidas, o pH da auga do mar pódese medir con gran precisión mediante técnicas analíticas ben establecidas (Clayton e Byrne, 1993). Non obstante, os cambios asociados á acidificación oceánica son relativamente pequenos se se comparan coa variabilidade natural do sistema. Por exemplo, a diminución media do pH superficial desde o inicio da Revolución Industrial é de arredor de 0,1-0,2 unidades (IPCC, 2021), mentres que as variacións naturais poden ser de magnitude similar ou mesmo maior, en función da rexión (figura 3). Por esta razón, detectar tendencias de acidificación oceánica require uns niveis moi elevados de exactitude, precisión e comparabilidade entre medidas tomadas por distintos grupos de investigación e ao longo do tempo para poder identificar tendencias robustas.

Neste contexto, un dos avances máis importantes das últimas décadas foi o desenvolvemento de bases de datos harmonizadas do sistema do carbonato na auga do mar, construídas a partir de medidas tomadas en campañas oceanográficas levadas a cabo por distintos grupos de investigación. Entre estas bases de datos destaca CARINA (Carbon In the Atlantic), que recompilou e harmonizou datos de múltiples campañas oceanográficas no Atlántico e en rexións adxacentes. Aida Fernández Ríos participou de forma activa neste esforzo internacional, pois formou parte do comité directivo do proxecto CARINA (1999-2004) e organizou en Vigo a primeira reunión do

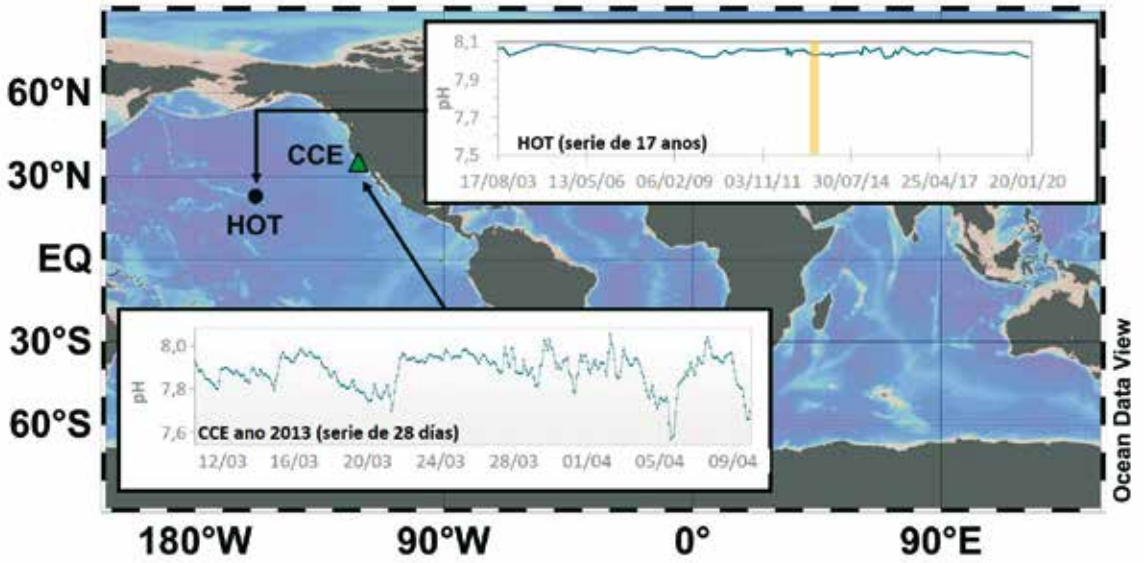


Figura 3. Evolución temporal do pH en dúas estacións de observación: unha estación oceánica (serie temporal Hawaii Ocean Time-series —HOT—; posición representada polo punto negro; datos de https://hahana.soest.hawaii.edu/hot/hot-dogs/bextraction.html) e unha estación costeira (fondeo dous do California Current Ecosystem —CCE—; posición representada polo triángulo verde; datos de https://mooring.ucsd.edu/cce2/cce2_03/). As diferenzas entre ambas reflicten a influencia de procesos locais e da variabilidade natural sobre o sinal de acidificación oceánica. A banda amarela no gráfico de HOT representa o mesmo período temporal que o representado polos datos de CCE

consorcio. Entre as contribucións á creación de CARINA destaca o traballo de Velo *et al.* (2010), centrado na revisión e no control de calidade dos datos do sistema do carbonato na auga do mar. A construción deste tipo de bases de datos harmonizadas require un esforzo considerable de control de calidade. As diferenzas metodolóxicas entre campañas ou pequenos erros analíticos poden introducir inconsistencias que dificultan a detección de tendencias a longo prazo. Por iso, unha parte fundamental destas bases harmonizadas consiste en comparar datos e aplicar axustes que permiten xerar conxuntos de datos coherentes entre si.

As tarefas de control de calidade e harmonización de datos no marco de CARINA non se limitaron ao Atlántico, senón que formaron parte dun esforzo global por construír conxuntos de datos coherentes a escala oceánica. Neste contexto, traballos como o de Lo Monaco *et al.* (2010) puxeron de manifesto a complexidade deste proceso ao analizar a consistencia interna dos datos no océano Austral. Estes estudos demostraron que, mesmo en augas profundas, poden existir discrepancias entre campañas debido tanto a erros analíticos como á propia variabilidade oceánica.

Grazas a estes procedementos de harmonización de datos mediante a aplicación de axustes sistemáticos e metodoloxías de intercomparación para garantir a coherencia entre datos, foi posible xerar produtos de datos integrados e de alta calidade, que constitúen a base para estudar a variabilidade do sistema do carbonato na auga do mar e detectar cambios a longo prazo, como a acidificación oceánica. Por este motivo, as bases de datos desenvolvidas no marco de CARINA supuxeron, ademais, un paso importante cara a iniciativas posteriores como GLODAP (Global Ocean Data Analysis Project; Olsen *et al.*, 2016), que ampliaron o alcance destes esforzos a escala global. En conxunto, estes esforzos permitiron construír unha referencia sólida sobre a distribución do CO_2 no océano.

Outra ferramenta clave para identificar os cambios derivados da acidificación oceánica son as seccións hidrográficas repetidas, unha estratexia de observación que consiste en repetir campañas oceanográficas polas mesmas rutas, separadas por intervalos de varios anos ou décadas. Estas seccións permiten comparar de forma directa as propiedades físicas e químicas da auga do mar en distintos momentos temporais, o que supón unha forma sólida de detectar tendencias asociadas ao cambio global. Moitas destas observacións lévanse a cabo no marco do programa internacional GO-SHIP (Global Ocean Ship-based Hydrographic Investigations Program; Sloyan *et al.*, 2019), que coordina campañas oceanográficas de alta calidade en distintas rexións do océano global. Aida Fernández Ríos participou de maneira activa neste tipo de observacións e liderou varias campañas oceanográficas no Atlántico, como as seccións FICARAM e OVIDE, correspondentes ás liñas hidrográficas A17 e A25 do programa GO-SHIP. Os datos obtidos nestas campañas contribuíron a mellorar o noso coñecemento sobre a evolución do sistema do carbonato no Atlántico.

A partir da análise de observacións repetidas e mais de conxuntos de datos calibrados con coidado, diversos estudos en que participou Aida Fernández Ríos identificaron tendencias de acidi-

ficación oceánica en distintas rexións e profundidades, que se desenvolven en seccións posteriores do capítulo. Estes traballos demostraron que o descenso do pH non se limita ás augas superficiais, senón que tamén afecta a augas intermedias e profundas a medida que o CO_2 absorbido na superficie é transportado cara ao interior do océano.

O traballo realizado nestas iniciativas demostra ata que punto o estudo da acidificación oceánica é un esforzo colectivo que depende da cooperación entre numerosos grupos de investigación. A participación de científicas como Aida Fernández Ríos nestes proxectos contribuíu a construír as bases de datos que hoxe permiten comprender mellor como está a mudar a química do océano.

3. A acidificación oceánica a escala global e rexional

Malia que a acidificación oceánica é un proceso global impulsado polo aumento do CO_2 atmosférico, as súas manifestacións presentan unha marcada variabilidade rexional (p. ex., Gattuso *et al.*, 2015). A magnitude e a velocidade dos cambios de pH dependen de múltiples factores, como a temperatura, a circulación oceánica, a actividade biolóxica ou as propiedades físico-químicas das augas. Esta variabilidade fai que, alén da tendencia global de descenso do pH, existan modelos rexionais complexos que só se poden entender a partir de observacións detalladas.

No océano aberto, isto é, en zonas afastadas da costa, os cambios na química do carbonato están controlados, principalmente, polo intercambio de CO_2 coa atmosfera e pola circulación oceánica a grande escala. Porén, nas zonas costeiras a situación é moito máis complexa. Nestas rexións, procesos como a respiración biolóxica, a descomposición da materia orgánica, as achegas continentais ou os afloramentos costeiros poden xerar variacións de pH moito maiores que as observadas en mar aberto (véxase o exemplo da figura 3), o que dificulta a detección dos sinais derivados da acidificación oceánica (Duarte *et al.*, 2013; Carstensen e Duarte, 2019). Por exemplo, en rexións de afloramento, onde as augas profundas ricas en CO_2 ascenden cara á superficie —como é o caso das rías galegas—, o pH pode ser máis baixo de forma natural. Estas condicións poden amplificar os efectos da acidificación oceánica de orixe antropoxénica, o que fai que certos ecosistemas sexan especialmente vulnerables. En contraste, en rexións tropicais —onde as augas son máis cálidas, a

solubilidade do CO_2 é menor e non existe afloramento—, a evolución da acidificación oceánica pode seguir modelos diferentes. Outro factor clave é a ventilación oceánica. En rexións como o Atlántico Norte ou o océano Austral, onde se forman augas profundas, o CO_2 absorbido na superficie pode ser transportado cara ao interior do océano, o que estende os efectos da acidificación oceánica a grandes profundidades. Isto implica que a acidificación oceánica non só é un fenómeno superficial, senón que afecta a todo o océano de maneira progresiva.

O traballo de Guallart *et al.* (2015) ilustra ben esta complexidade. A partir da comparación de observacións realizadas en 1992 e 2011 ao longo da sección 24,5° N no Atlántico subtropical, identificouse un descenso xeneralizado do pH nos primeiros mil metros da columna de auga. Non obstante, o estudo demostrou que os cambios non son uniformes en relación coa profundidade e que as maiores taxas de acidificación oceánica se daban en capas subsuperficiais, sobre todo por baixo da termoclina estacional. Este modelo explícase pola combinación de dous compoñentes: por unha banda, o sinal antropoxénico, asociado á absorción de CO_2 atmosférico, que domina nas capas superficiais; pola outra, procesos naturais como a descomposición (remineralización) da materia orgánica, que modulan de maneira importante a distribución vertical do pH. Como resultado, nalgunhas rexións e profundidades estes procesos naturais poden mesmo contrarrestar ou amplificar o sinal da acidificación oceánica e xerar unha distribución espacial heteroxénea. Ademais, o estudo mostrou que o sinal antropoxénico se pode detectar tamén en augas profundas do Atlántico occidental, transportadas pola circulación oceánica ao longo da corrente profunda do bordo occidental.

A variabilidade rexional é aínda máis evidente en zonas costeiras ou sistemas semipechados, como o mar Mediterráneo. Neste sentido, o traballo de Flecha *et al.* (2015), baseado en observacións de alta frecuencia no estreito de Xibraltar, detectou unha clara tendencia de diminución do pH nun período relativamente curto. Este resultado demostra que, con medidas precisas e continuas, é posible identificar sinais de acidificación oceánica mesmo en escalas temporais reducidas. Ademais, este traballo evidenciou que diferentes masas de auga dentro do Mediterráneo presentan taxas de acidificación oceánica distintas, o que reflicte a súa historia bioxeoquímica e a súa conexión co océano Atlántico. En particular, a entrada de augas atlánticas ricas en CO_2 antropoxénico contribúe á evolución química da bacía mediterránea.

En conxunto, estes estudos ilustran que a acidificación oceánica é o resultado da interacción entre forzamentos globais e procesos rexionais e que non se pode entender só como unha tendencia global uniforme. Comprender esta variabilidade espacial é fundamental para interpretar de forma correcta as observacións e para avaliar os impactos da acidificación oceánica nos ecosistemas mariños. Tamén pon de manifesto a necesidade de manter redes de observación distribuídas a escala global, capaces de detectar tanto as tendencias a grande escala como as particularidades rexionais.

4. O Atlántico Norte como laboratorio natural do cambio químico do océano

O Atlántico Norte é unha das rexións en que a acidificación oceánica se manifesta con maior claridade, debido ao papel que desempeña esta bacía na absorción e redistribución do CO_2 antropoxénico. En rexións de altas latitudes como o Atlántico Norte, as augas superficiais arrefrían, aumentan a súa densidade e afúndense, proceso coñecido como formación de masas de auga, e transportan consigo o CO_2 absorbido desde a atmosfera. Este proceso de formación de masas de auga, xunto coas baixas temperaturas das súas augas superficiais —que permiten que unha maior cantidade de CO_2 se disolva nelas—, converte o Atlántico Norte nunha das principais portas de entrada de CO_2 antropoxénico cara ao interior do océano e permite observar como progresa a acidificación oceánica en toda a columna de auga.

As observacións realizadas ao longo de seccións hidrográficas repetidas permitiron documentar como este CO_2 se acumula de modo progresivo en distintas capas do océano, o que dá lugar a descensos significativos do pH non só na superficie, senón tamén nas augas intermedias e profundas. Traballos como os de Vázquez-Rodríguez *et al.* (2012), Ríos *et al.* (2015) ou García-Ibáñez *et al.* (2016), desenvolvidos no marco de proxectos liderados por Aida Fernández Ríos e de campañas oceanográficas nas que participou activamente, foron fundamentais para cuantificar estes cambios e para comprender os procesos físicos e bioxeoquímicos que os controlan.

O traballo de Vázquez-Rodríguez *et al.* (2012) proporcionou unha das primeiras cuantificacións directas das taxas de acidificación oceánica en seccións repetidas no Atlántico Norte

subpolar. Este estudo puxo de manifesto que o sinal de acidificación oceánica non se restrinxe á capa superficial, senón que se transmite de maneira eficaz cara ao interior do océano mediante a formación e ventilación de masas de auga, o que afecta de forma destacada ás augas intermedias. Nestas capas, as taxas de acidificación oceánica resultaron comparables —e mesmo localmente superiores— ás observadas na superficie, o que evidencia unha propagación eficiente do CO_2 antropoxénico en profundidade.

A escala de toda a bacía atlántica, o estudo de Ríos *et al.* (2015) ampliou esta perspectiva ao mostrar que, durante as últimas décadas, boa parte dos cambios de pH aconteceron en augas centrais e intermedias. Nestas capas, os compoñentes antropoxénicos e naturais son de magnitude similar e actúan de forma conxunta, o que intensifica a acidificación oceánica. Este resultado destaca a relevancia da circulación oceánica e dos cambios na formación de masas de auga como factores que modulan e, nalgúns casos, amplifican o sinal antropoxénico da acidificación oceánica.

Pola súa banda, García-Ibáñez *et al.* (2016) ofreceron unha visión detallada dos mecanismos que controlan a acidificación oceánica no Atlántico Norte subpolar. Os seus resultados confirmaron que o aumento do CO_2 antropoxénico é o principal motor da acidificación oceánica en todas as masas de auga, malia que a súa expresión está modulada por outros factores, como as variacións da alcalinidade e a temperatura. Un aspecto particularmente relevante deste estudo é a evidencia de que a acidificación oceánica se estende tamén a augas profundas, o que reflicte tanto a ventilación relativamente recente como o progresivo avellentamento das masas de auga.

En conxunto, estes estudos poñen de manifesto que a acidificación oceánica no Atlántico Norte non é un fenómeno limitado á superficie, senón un proceso que afecta de maneira gradual a toda a columna de auga, impulsado pola interacción entre a absorción de CO_2 atmosférico e a dinámica da circulación oceánica.

Neste sentido, o Atlántico Norte pódese considerar un laboratorio natural no que é posible observar, en escalas de tempo humanas, os cambios que están a acontecer na química do océano. As leccións aprendidas nesta rexión son fundamentais para comprender a evolución futura da acidificación oceánica a escala global.

5. A química do carbonato e as súas implicacións para a vida mariña

Malia que o pH é un dos indicadores máis empregados para describir a acidificación oceánica, non é o único parámetro relevante para comprender as súas consecuencias. Os cambios na química do sistema do carbonato na auga do mar tamén afectan a outras variables clave, como a concentración de ións carbonato e o estado de saturación do carbonato cálcico, fundamental para numerosos organismos mariños.

O estado de saturación do carbonato cálcico, representado como Ω, determina a facilidade con que os organismos calcificadores —como corais, moluscos ou determinados grupos de plancto— poden formar as súas estruturas calcarias. Cando as augas están sobresaturadas ($\Omega > 1$), estes organismos poden formar as súas cunchas e os seus esqueletos con maior facilidade. Porén, a medida que aumenta a concentración de CO_2 na auga e diminúe o pH, a concentración de ións carbonato redúcese, o que provoca unha diminución do estado de saturación. En condicións máis extremas ($\Omega < 1$), isto pode dificultar a calcificación e mesmo favorecer a disolución destas estruturas.

Neste contexto, o traballo de Rosón *et al.* (2016) achega unha perspectiva moi relevante ao mostrar que a distribución do calcio disolto no océano non sempre segue o comportamento conservativo que de modo tradicional se asume a partir da salinidade. Este estudo identificou un exceso sistemático de calcio en augas profundas do Atlántico subtropical, asociado sobre todo a procesos de disolución bentónica de carbonato cálcico e, en menor medida, a achegas fluviais. Este resultado ten implicacións directas na estimación do estado de saturación dos minerais carbonatados. Ao utilizar medidas reais de calcio no canto de valores estimados, obtéñense horizontes de saturación máis superficiais. Isto implica que as condicións que favorecen a disolución dos minerais de carbonato cálcico poden alcanzarse a menores profundidades do que se pensaba nun inicio, o que resulta especialmente relevante no contexto da acidificación oceánica.

Alén da descrición destes cambios químicos, unha das cuestións clave é como responden os organismos mariños á acidificación oceánica. Para abordar esta pregunta, é necesario combinar as observacións no medio natural con experimentos en condicións controladas que permitan illar os efectos da acidificación oceánica. Neste sentido, o traballo de Diz *et al.* (2015) contribuíu ao desen-

volvemento de sistemas experimentais deseñados de maneira específica para estudar os efectos da acidificación oceánica sobre organismos calcificadores. Neste estudo descríbese un sistema capaz de manter condicións de pH estables durante longos períodos de tempo, o que constitúe un requisito fundamental para simular escenarios de acidificación oceánica no laboratorio. Os resultados mostraron que o deseño experimental permite reproducir con precisión diferenzas de pH entre distintos tratamentos, o que proporciona unha ferramenta robusta para o estudo da resposta de organismos mariños a cambios na química da auga do mar. O traballo puxo de manifesto tanto a viabilidade deste tipo de aproximacións como os retos asociados ao cultivo de organismos en condicións controladas.

Este tipo de investigacións experimentais resulta esencial para interpretar as consecuencias biolóxicas da acidificación oceánica. En combinación coas observacións no océano, permiten avanzar cara a unha comprensión máis completa deste proceso, ao mostrar que non se trata só dun cambio químico, senón dun fenómeno con implicacións directas para os ecosistemas mariños.

6. Detrás dos datos: traballar con Aida Fernández Ríos

A miña relación científica con Aida Fernández Ríos iniciouse en 2011, co comezo da miña tese de doutoramento no grupo de Oceanoloxía, desenvolvida no marco do proxecto CATARINA, baixo o seu liderado como investigadora principal e xefa da campaña oceanográfica homónima. Malia que non foi a miña directora de tese, participaba con frecuencia nas discusións científicas e formaba parte activa da contorna de traballo na que me formei como investigadora. Durante aqueles anos, coincidimos en distintas actividades científicas e en varias campañas oceanográficas, que son unha parte esencial do traballo en oceanografía.

Aida Fernández Ríos era unha científica profundamente colaborativa. No grupo desempeñaba un papel que ía alén da súa propia investigación. Tiña unha gran capacidade para conectar persoas, facilitar colaboracións e crear un ambiente de traballo aberto. En moitos sentidos, foi unha das persoas que contribuíu a dar visibilidade internacional ao grupo en que desenvolveu a súa carreira científica. A súa capacidade para se relacionar con persoal investigador de distintos países e disciplinas complementaba moi ben o perfil máis analítico e conceptual doutros colegas do

Aida Fernández Ríos durante unha campaña oceanográfica, participando nun dos momentos de convivencia a bordo xunto ao capitán do buque oceanográfico Sarmiento de Gamboa, Rafael García Giráldez, e unha das investigadoras participantes do IFREMER, Pascale Lherminier. As campañas oceanográficas tamén son espazos de intercambio humano e cultural, algo que Aida sempre fomentaba

grupo. Esa combinación de talento científico e habilidades persoais permitiulle levar a cabo proxectos ambiciosos e participar en numerosas iniciativas internacionais.

Un dos recordos máis vívidos que teño dela procede da miña primeira campaña oceanográfica. Naquela ocasión ela era a investigadora principal da campaña. Para quen comeza en oceanografía, a primeira campaña nun buque de investigación adoita ser unha experiencia intensa: longas xornadas de traballo, quendas nocturnas, condicións meteorolóxicas cambiantes e un ritmo de actividade constante. Nese contexto, o ambiente humano a bordo resulta tan importante como a propia organización científica da campaña. Aida tiña unha capacidade extraordinaria para manter o ánimo do equipo mesmo nos momentos máis difíciles. Recordo especialmente un día de mal tempo no que o estado do mar impedía realizar as operacións previstas. No canto de permitir que a frustración se instalase no ambiente, decidiu organizar un pequeno momento de convivencia a bordo. Mercou refrescos para todo o equipo e acabamos improvisando unha pequena celebración que axudou a relaxar o ambiente e a reforzar a sensación de equipo.

Os domingos, que en moitas campañas se converten en momentos algo máis distendidos dentro da intensa rutina científica, Aida adoitaba participar con entusiasmo nas actividades sociais que xurdían de forma espontánea entre a tripulación e o equipo científico. Nunha daquelas ocasións, o capitán do barco sacou unha gaita e comezou a tocar música tradicional galega. Ela non dubidou en unirse á improvisada celebración, cantando e participando activamente naquel momento que mesturaba tradición, música e vida no mar. Ese tipo de situacións reflicten ben o seu carácter aberto e a súa capacidade para crear un ambiente acolledor mesmo nun contexto tan esixente como unha campaña oceanográfica.

Para os que comezabamos daquela a nosa carreira científica, ese tipo de xestos tiñan un valor importante. As campañas oceanográficas son experiencias intensas nas que conviven persoas de distintos países, disciplinas e traxectorias profesionais. A capacidade de crear un ambiente de colaboración e respecto mutuo resulta fundamental para o éxito científico da campaña.

Co paso do tempo comprendín mellor ata que punto esa dimensión humana tamén forma parte da ciencia. Alén das súas contribucións científicas ao estudo da bioxeoquímica mariña, Aida Fernández Ríos deixou unha pegada importante en moitas das persoas que traballaron con ela. O entusiasmo,

a capacidade para conectar cos demais e a súa maneira de vivir a ciencia como unha actividade colectiva seguen a ser parte do recordo que moitos conservamos dela.

7. Conclusión: o que nos revela a acidificación do océano

A acidificación oceánica é un dos cambios máis profundos e menos visibles que está a experimentar o sistema Terra. Malia que os seus efectos non sempre son inmediatos ou perceptibles con facilidade, as súas consecuencias pódense estender durante décadas e afectar a múltiples niveis do ecosistema mariño.

As observacións realizadas nas últimas décadas permitiron identificar con claridade os sinais deste proceso e comprender mellor os mecanismos que o controlan. Este coñecemento é o resultado dun esforzo colectivo sostido no tempo, baseado na cooperación internacional e no desenvolvemento de redes de observación de alta calidade.

Neste contexto, a contribución de científicas como Aida Fernández Ríos foi fundamental. O seu traballo axudou a construír as bases de datos e os marcos de análise que hoxe permiten entender como está a mudar a química do océano.

Comprender a acidificación oceánica implica, xa que logo, integrar observacións, procesos e respostas biolóxicas, nun esforzo colectivo que resulta clave para anticipar a evolución futura do océano.

Referencias bibliográficas

Carstensen J., Duarte C.M. (2019). Drivers of pH variability in coastal ecosystems. Environmental Science and Technology, 53, 4020-4029. doi:10.1021/acs.est.8b03655.

Clayton T.D., Byrne R.H. (1993). Spectrophotometric seawater pH measurements: total hydrogen ion concentration scale calibration of m-cresol purple and at-sea results. Deep Sea Research, Part Oceanographic Research Papers, 40, 2115-2129. doi:10.1016/0967-0637(93)90048-8.

Diz P., Mena A., Nombela M.A., Castaño-Carrera M., Velo A., Ordóñez N., Fuentes-Lema A., Francés G., Rosón G., Pérez F.F., Ríos A.F. (2015). Description of an experimental set up for the culture

of benthic foraminifera in controlled pH conditions. Thalassas, 31, 23-32. https://hdl.handle.net/10261/137792.

Doney S.C., Busch D.S., Cooley S.R., Kroeker K.J. (2020). The impacts of ocean acidification on marine ecosystems and reliant human communities. Annual Review of Environmental Resources, 45, 83-112. doi:10.1146/annurev-environ-012320-083019.

Duarte C.M., Hendriks I.E., Moore T.S., Olsen Y.S., Steckbauer A., Ramajo L., et al. (2013). Is ocean acidification an open-ocean syndrome? Understanding anthropogenic impacts on seawater pH. Estuaries and Coasts, 36, 221-236. doi:10.1007/s12237-013-9594-3.

Findlay H.S., Feely R.A., Jiang L.-Q., Pelletier G. Bednaršek N. (2025). Ocean Acidification: Another Planetary Boundary Crossed. Global Change Biology, 31, e70238. doi:10.1111/gcb.70238.

Flecha S., Pérez F.F., García-Lafuente J., Sammartino S., Ríos A.F., Huertas I.E. (2015). Trends of pH decrease in the Mediterranean Sea through high frequency observational data: Indication of ocean acidification in the basin. Scientific Reports, 5, 16770. doi:10.1038/srep16770.

Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M.W., Andrew R.M., Bakker D.C.E., Hauck J., et al. (2026). Global Carbon Budget 2025. Earth System Science Data, 18, 3211-3288. doi:10.5194/essd-18-3211-2026.

García-Ibáñez M.I., Zunino P., Fröb F., Carracedo L.I., Ríos A.F., Mercier H., Olsen A., Pérez F.F. (2016). Ocean acidification in the subpolar North Atlantic: Rates and mechanisms controlling pH changes. Biogeosciences, 13, 3701-3715. doi:10.5194/bg-13-3701-2016.

Gattuso J.-P., Magnan A., Billé R., Cheung W.W.L., Howes E.L., Joos F., et al. (2015). Contrasting futures for ocean and society from different anthropogenic CO_2 emissions scenarios. Science, 349, aac4722. doi:10.1126/science.aac4722.

Guallart E.F., Fajar N.M., Padín X.A., Vázquez-Rodríguez M., Calvo E., Ríos A.F., Hernández-Guerra A., Pelejero C., Pérez F.F. (2015). Ocean acidification along the 24.5°N section in the subtropical North Atlantic. Geophysical Research Letters, 42, 450-458. doi:10.1002/2014GL062971.

IPCC (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis

M.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R., Zhou B. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.

Kroeker K.J., Kordas R.L., Crim R., Hendriks I.E., Ramajo L., Singh G.S., et al. (2013). Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming. Global Change Biololgy, 19, 1884-1896. doi:10.1111/gcb.12179.

Lo Monaco C., Álvarez M., Key R.M., Lin X., Tanhua T., Tilbrook B., Bakker D.C.E., Van Heuven S., Hoppema M., Metzl N., Ríos A.F., Sabine C.L., Velo A. (2010). Assessing the internal consistency of the CARINA database in the Indian sector of the Southern Ocean. Earth System Science Data, 2, 51-70. doi:10.5194/essd-2-51-2010.

Mostofa K.M.G., Liu C.-Q., Zhai W., Minella M., Vione D., Gao K., et al. (2016). Reviews and Synthe ses: Ocean acidification and its potential impacts on marine ecosystems. Biogeosciences, 13, 1767-1786. doi:10.5194/bg-13-1767-2016.

Olsen A., Key R.M., Van Heuven S., Lauvset S.K., Velo A., Lin X., Schirnick C., Kozyr A., Tanhua T., Hoppema M., Jutterström S., Steinfeldt R., Jeansson E., Ishii M., Pérez F.F., Suzuki T. (2016). The Global Ocean Data Analysis Project version 2 (GLODAPv2) – an internally consistent data product for the world ocean. Earth System Science Data, 8, 297-323. doi:10.5194/essd-8-297--2016.

Riebesell U., Zondervan I., Rost B., Tortell P.D., Zeebe R.E., Morel F.M.M. (2000). Reduced calcification of marine plankton in response to increased atmospheric CO_2. Nature, 407, 364. doi:10.1038/35030078.

Ríos A.F., Resplandy L., García-Ibáñez M.I., Fajar N.M., Velo A., Padín X.A., Wanninkhof R., Steinfeldt R., Rosón G., Pérez F.F., Morel F.M.M. (2015). Decadal acidification in the water masses of the Atlantic Ocean. Proceedings of the Natural Academy Sciences of USA, 112, 9950-9955. doi:10.1073/pnas.1504613112.

Rockström J., Steffen W., Noone K., et al. (2009). A safe operating space for humanity. Nature, 461, 472-475. doi:10.1038/461472a.

Rosón G., Guallart E.F., Pérez F.F., Ríos A.F. (2016). Calcium distribution in the subtropical Atlantic Ocean: Implications for calcium excess and saturation horizons. Journal of Marine Systems, 158, 45-51. doi:10.1016/j.jmarsys.2016.01.011.

Sloyan B.M., Wanninkhof R., Kramp M., Johnson G.C., Talley L.D., Tanhua T., McDonagh E., Cusack C., O'Rourke E., McGovern E., Katsumata K., Diggs S., Hummon J., Ishii M., Azetsu-Scott K., Boss E., Ansorge I., Pérez F.F., Mercier H., Williams M.J.M., Anderson L., Lee J.H., Murata A., Kouketsu S., Jeansson E., Hoppema M., Campos E. (2019). The Global Ocean Ship-Based Hydrographic Investigations Program (GO-SHIP): A Platform for Integrated Multidisciplinary Ocean Science. Frontiers of Marine Science, 6, 445. doi:10.3389/fmars.2019.00445.

Vázquez-Rodríguez M., Pérez F.F., Velo A., Ríos A.F., Mercier H. (2012). Observed acidification trends in North Atlantic water masses. Biogeosciences, 9, 5217-5230. doi:10.5194/bg-9-5217-2012.

Velo A., Pérez F.F., Lin X., Key R.M., Tanhua T., De la Paz M., Olsen A., Van Heuven S., Jutterström S., Ríos A.F. (2010). CARINA data synthesis project: pH data scale unification and cruise adjustments. Earth System Science Data, 2, 133-155. doi:10.5194/essd-2-133-2010.

Zeebe R., Wolf-Gladrow D. (2001). CO_2 in Seawater: Equilibrium, Kinetics, Isotopes. Elsevier Oceanography Book Series, 65, Amsterdam, 346 pp.

Aida Fernández Ríos: ciencia de excelencia e de colaboración

Herlé Mercier
Université de Brest, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), IFREMER, Institut Recherche pour le Développement (IRD), Laboratoire de Physique des Océans, Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM)

A traxectoria científica de Aida Fernández Ríos impresiona pola súa envergadura: máis dun cento de publicacións, importantes cargos de responsabilidade no CSIC, o recoñecemento internacional no ámbito da bioxeoquímica mariña polo estudo do ciclo do carbono oceánico e a acidificación dos océanos, e unha participación activa en grandes programas internacionais que marcaron a oceanografía moderna. Non obstante, reducir a Aida Fernández Ríos a estes logros sería obviar o esencial.

Para quen tivo a sorte de traballar ao seu carón, Aida encarnaba un liderado científico pouco común: unha autoridade natural, sen ostentación, que conxugaba esixencia e capacidade de unión, sen buscar nunca o recoñecemento persoal. Era unha «forza tranquila» cuxa bondade agochaba unha determinación inquebrantable. Tiven o privilexio de colaborar con ela durante moitos anos, sobre todo no marco de programas internacionais sobre a circulación oceánica e o papel do océano no clima, e o meu recordo dela está ligado a esa súa dimensión internacional, marcada pola competencia, o espírito de cooperación e a humanidade.

Desde os anos noventa, consolidouse como referente da comunidade oceanográfica internacional, sobre todo grazas á súa participación no World Ocean Circulation Experiment (WOCE), un programa que transformou a nosa comprensión do océano global. As súas áreas de especialidade eran os nutrientes, o sistema do carbono mariño e a caracterización bioxeoquímica das masas de auga. Nun campo en que a calidade das medicións é fundamental, o seu traballo era referencial.

Naquela altura, as colaboracións internacionais baseábanse tanto na confianza entre as persoas como nas estruturas institucionais, e Aida Fernández Ríos destacaba nesa función: tiña o don de establecer vínculos sólidos e duradeiros entre persoal investigador de diferentes disci-

plinas, laboratorios e países, capacidade que simplemente nacía da súa personalidade. Recordo que nunca iniciaba un debate científico ou organizativo partindo do problema concreto; antes de abordar o tema saudábate con cordialidade, preguntábache que tal estabas, e esa cortesía honesta axiña propiciaba un clima de confianza. Nun ámbito decote competitivo, ela cultivaba a escoita e o respecto mutuo.

Esa calidade humana foi un dos motores da súa actividade internacional. As colaboracións que foi construíndo non eran simples alianzas formais, senón que se baseaban en relacións persoais sólidas que perduraban alén dos proxectos e do financiamento. O seu papel no desenvolvemento da cooperación franco-española no campo da oceanografía é un exemplo claro: durante as campañas de WOCE, contribuíu a achegar as comunidades científicas de ambos os países. Grazas á súa visión e á súa capacidade para identificar as complementariedades nos equipos, facilitou intercambios que deron lugar a colaboracións duradeiras.

Foi ela precisamente quen me presentou a Fiz Fernández Pérez, con quen despois desenvolvín unha colaboración científica especialmente frutífera. Fiz converteuse nun dos piares do programa OVIDE, sobre todo no tocante ás medicións de pH e de alcalinidade, así como ás análises sobre as ligazóns entre a circulación de retorno meridional do Atlántico (AMOC, pola súa sigla en inglés) e a almacenaxe oceánica do carbono. Os traballos froito desa cooperación contribuíron en gran medida a mellorar a nosa comprensión do papel do Atlántico Norte na regulación do clima.

A historia de OVIDE ilustra á perfección a maneira de concibir a ciencia de Aida Fernández Ríos. Este programa, hoxe recoñecido como un dos principais observatorios do Atlántico Norte subpolar, naceu da vontade común de equipos franceses e españois de poñer en marcha unha observación regular da circulación oceánica e das propiedades bioxeoquímicas. Ela foi unha das persoas que posibilitaron esa pretensión, pois comprendía que os grandes desafíos científicos só podían abordarse mediante esforzos colectivos e internacionais. Así mesmo, cómpre engadir que se expresaba cunha soltura notable en francés, lingua que dominaba á perfección, o que facilitou moito as súas colaboracións cos equipos francófonos. Ademais, o seu humor, sempre presente, alixeiraba os momentos máis intensos. Recordo en especial unha reunión de OVIDE

en Vigo, onde, ao serán, nos levou visitar o parque do Castro para amosarnos a estatua *Muller cavilando*. Cun sorriso raposeiro, comparouna cunha científica inmersa nas súas reflexións ante un problema complexo.

As súas contribucións abarcaron temas que se volveron centrais na investigación climática: a circulación oceánica, o almacenamento do carbono antropoxénico e os intercambios de CO_2 entre o océano e a atmosfera, así como a acidificación dos océanos. Moito antes de que estas cuestións se convertesen en preocupacións centrais, ela xa se decatara da súa importancia; a súa participación nos programas WOCE, CLIVAR, CARBOOCEAN, CARBOCHANGE e moitos outros proxectos europeos así o demostra. Contribuíu en traballos de síntese que hoxe son referentes, como a avaliación global do almacenamento oceánico do carbono antropoxénico publicada na revista *Science* en 2004.

Porén, quen traballou con ela sabe que a súa contribución non se limitaba a producir datos ou redactar artigos. Aida Fernández Ríos desempeñaba un papel discreto pero fundamental na estruturación dos proxectos e na cohesión dos equipos. Grazas a un gran sentido da organización, facía avanzar os temas máis complexos sen crear tensións inservibles.

Esa eficacia baseábase nunha credibilidade científica indiscutible, pois era extremadamente competente e rigorosa. Os seus compañeiros e compañeiras sabían que podían confiar no seu criterio e, cando expresaba unha opinión, escoitábana con atención. Con todo, nunca pretendía impor o seu punto de vista, senón que prefería convencer con feitos, coa calidade das análises e co diálogo. Esa combinación de competencia e humildade explica, sen dúbida, a influencia que exercía no seo de numerosas redes internacionais nas que participaba. Era respectada non só polo que sabía, senón tamén pola súa forma de traballar cos demais.

Alén da científica atopábase unha muller fondamente ligada á súa Galicia, orgullosa das súas raíces. Encantáballe a música galega e falaba da súa terra con afecto. Esa fidelidade ás súas orixes coexistía de forma natural cunha curiosidade intelectual aberta ao mundo. Afeccionada ao fútbol, era unha fiel seareira do Celta de Vigo. Recordo con especial cariño unha visita que me fixo á Bretaña. Como sabía que o meu fillo era porteiro nun equipo xuvenil de Plouzané, tróuxolle

O equipo científico da expedición OVIDE 2010, reunido na cuberta de proa do B/O Thalassa en xullo de 2010 fronte á costa de Groenlandia, celebra o final da misión. Aida Fernández Ríos (na primeira fila desta foto, a terceira pola esquerda) e o seu equipo realizaron medicións de pH e alcalinidade. Fonte: Grupo OVIDE

un póster de Richard Dutruel, o porteiro do Celta. Aquel foi un xesto tipicamente «aidiano», solícito e xeneroso: decatárase dun detalle, recordárao e tomara a molestia de compracelo. Ese tipo de xestos dicían moito da súa personalidade.

Estas lembranzas poden semellar anecdóticas ante a magnitude da súa obra científica, mais son fundamentais para entender por que a tantas persoas lles afectou moito o seu falecemento. As grandes traxectorias deixan publicacións, proxectos e institucións; Aida tamén deixa recordos, amizades e unha forma de ser que segue inspirando a quen a coñeceu. O seu repentino pasamento en decembro de 2015 foi un duro golpe para toda a comunidade oceanográfica. Alén da perda científica, todo o mundo tiña a sensación de perder unha compañeira excepcional e unha amiga. Os testemuños procedentes de toda Europa e doutros lugares demostraron ata que punto a súa influencia superaba amplamente as fronteiras do seu laboratorio ou do seu país.

Dez anos despois, o seu legado segue vivo. Atópase nos programas que axudou a construír, nas redes científicas que fortaleceu, no novo persoal investigador que formou e acompañou, así como no coñecemento sobre o funcionamento do océano e o seu papel no sistema climático, cuxa adquisición facilitou.

Con todo, o seu legado tamén reside nun modelo de práctica científica. Nun tempo en que a investigación adoita estar sometida a esixencias crecentes de competitividade e visibilidade, Aida Fernández Ríos recordaba co seu exemplo que a excelencia científica é perfectamente compatible coa modestia, a xenerosidade e a atención cos demais. Amosounos que era posible construír unha carreira internacional de primeira orde sen renunciar aos valores humanos e demostrou que os grandes avances científicos a miúdo xorden tanto da confianza, a amizade e o respecto mutuo como da intelixencia e o traballo.

Para moitos de nós, Aida Fernández Ríos seguirá a ser moito máis que unha grande oceanógrafa. Seguirá a ser o símbolo dunha ciencia aberta, colaborativa e fondamente humana, unha ciencia que achega as persoas ao tempo que fai progresar o coñecemento. Ese é, seguramente, o seu legado máis valioso.

Aida Fernández Ríos: compañeira e amiga

Carmen González Sotelo
Profesora de investigación e delegada institucional do CSIC en Galicia

José Luis Garrido
Investigador científico do CSIC

Vicedirectora e vicedirector durante a etapa de Aida Fernández Ríos como directora do Instituto de Investigacións Mariñas

1. Aida Fernández Ríos: oceanógrafa e xestora

A Real Academia Galega de Ciencias (RAGC) elixiu en 2026 a Aida Fernández Ríos (1947--2015) como científica galega do ano co propósito de pór en valor o seu legado e o seu papel como referente da ciencia mariña feita desde Galicia. Este recoñecemento permite, ademais, iluminar unha dimensión menos visible e, no entanto, decisiva: a súa capacidade para dirixir, dar cohesión e fortalecer institucións científicas.

Aida Fernández Ríos foi directora do Instituto de Investigacións Mariñas (IIM-CSIC) entre 2006 e 2011, a primeira muller en ocupar ese cargo. As persoas que formamos parte do equipo directivo durante ese período recordámola como unha líder eficaz, próxima e rigorosa, cunha combinación pouco frecuente de visión estratéxica, empatía e positividade.

O obxectivo deste capítulo é presentar a súa faceta como xestora, a súa maneira de entender a dirección dun centro científico, que prioridades impulsou e que estilo de liderado exerceu, así como ofrecer, desde esa experiencia compartida, un perfil biográfico persoal centrado na súa dimensión humana e cotiá.

2. O Instituto de Investigacións Mariñas: un breve contexto histórico

O Instituto de Investigacións Mariñas (IIM), pertencente ao Consello Superior de Investigacións Científicas (CSIC), é un centro cunha traxectoria de máis de sete décadas e unha vocación

intrinsecamente multidisciplinaria no ámbito das ciencias mariñas. O seu antecedente directo foi o Instituto de Investigaciones Pesqueras (IIP), formalizado en 1951 como organismo nacional de investigación nun contexto de expansión do sector pesqueiro tras a posguerra. Con sede central en Barcelona, o IIP articulou unha rede de laboratorios costeiros, entre eles o de Vigo, cuxa actividade se iniciou en 1952, orientada a darlles resposta científica aos principais retos do sector mariño-pesqueiro.

Desde os seus inicios, o Laboratorio de Vigo caracterizouse por unha notable diversidade temática e unha estreita colaboración entre disciplinas, desde a oceanografía química e biolóxica ata o estudo aplicado de especies de interese comercial, acuicultura e tecnoloxía de produtos mariños. Esta orientación respondía tanto á riqueza da contorna natural da ría de Vigo como á súa crecente importancia económica na pesca, a acuicultura e a transformación de produtos do mar.

O desenvolvemento do IIP viuse impulsado de maneira significativa durante os plans de desenvolvemento económico de finais dos anos sesenta e comezos dos setenta, que favoreceron o investimento en infraestruturas científicas e recursos humanos. Neste período tamén se incorporaron medios clave para a investigación mariña en España, como os buques oceanográficos Cornide de Saavedra e García del Cid, que ampliaron de forma notable as capacidades de traballo no medio mariño. Un fito fundamental na consolidación do centro de Vigo foi o traslado, en 1973, á súa sede definitiva en Bouzas, nun edificio deseñado por Desiderio Pernas que continúa a ser hoxe a sede do IIM.

Estas instalacións supuxeron un salto cualitativo decisivo, pois dotaron o centro de infraestruturas modernas (tanques de cultivo, laboratorios especializados e unha planta piloto de procesamento) e permitiron o seu desenvolvemento como referente en investigación mariña, ao integrar o estudo do medio físico, a bioloxía de especies explotadas, a pesca, a acuicultura e a tecnoloxía dos produtos derivados.

A finais dos anos setenta, a reorganización do CSIC favoreceu a autonomía dos laboratorios e a súa transformación en institutos independentes. Neste proceso, o centro de Vigo adquiriu de forma progresiva unha identidade institucional diferenciada, que culminaría coa adopción, en 1986, da denominación actual de Instituto de Investigacións Mariñas. Esta evolución institucional acompañouse dun crecemento progresivo en persoal e en estrutura científica. A mediados dos anos oitenta, o instituto xa contaba con diversos grupos de investigación organizados arredor de dúas unidades

Instalacións do Laboratorio de Vigo do Instituto de Investigaciones Pesqueras en Bouzas (1973)

estruturais, así como con persoal investigador, técnico e de servizos que reflectía a súa complexidade organizativa e a súa proxección científica.

En conxunto, a traxectoria do IIM configura un modelo de centro no que converxen diferentes disciplinas e perfís profesionais arredor da investigación mariña. Este sinal de identidade tradúcese en esixencias organizativas específicas: por unha banda, a necesidade dunha xestión científica compartida, na que estean representados perfís con experiencia nas principais áreas de investigación; pola outra, a articulación de recursos humanos, infraestruturas e servizos que respondan a esa diversidade disciplinaria. Así mesmo, implica o desenvolvemento de relacións institucionais con distintos actores, tanto dos sectores económicos vinculados ao ámbito mariño como das áreas científicotécnicas que encaixan coas liñas de investigación do instituto.

Aida Fernández Ríos nunha das sesións do Seminario Interdisciplinario de Acuicultura Mariña que se organizou no Laboratorio de Vigo do IIP do 18 ao 21 de setembro de 1973

3. Medrar no Instituto de Investigacións Mariñas

Aida Fernández Ríos chegou ao instituto en 1972 como auxiliar de investigación e percorreu, paso a paso, etapas técnicas e científicas ata alcanzar o máximo nivel profesional. Ese itinerario non se cita aquí como mérito académico, xa tratado noutro capítulo, senón como clave da súa forma de xestionar: coñecía a institución «por dentro», as diferentes liñas de investigación, a calidade humana dos seus integrantes e o potencial de crecemento, mais tamén as súas limitacións.

Naqueles anos, Aida tivo a oportunidade de traballar no grupo de pesqueiras, tal como ela mesma manifestou nunha entrevista, e de participar en campañas como as GALICIA I e II, entre outras, nas que se facían tanto estudos do medio físico como avaliacións biolóxicas das especies pesqueiras. De feito, destaca o bo ambiente que existía nestas campañas, nas que tanto o persoal investigador (sénior e en formación) como o persoal técnico se esforzaban en levar a cabo o seu labor cunha enorme dedicación e camaradaría (Guerra e Prego, 2003).

Na práctica, esa experiencia traduciuse nunha dirección cunha atención aos detalles que a miúdo se consideran «menores», pero que sosteñen o progreso na investigación científica e técnica: a importancia dos equipos unidos, o valor do traballo do persoal técnico, a calidade dos datos e das mostras, a coordinación entre as diferentes liñas de investigación, a preocupación por mellorar os servizos xerais e administrativos, e a convicción de que a excelencia científica non se improvisa se a base operativa falla.

Ese coñecemento da historia do IIM e mais a súa visión da importancia dos referentes levárona a organizar o Encontro Retrospectivo do Instituto de Investigacións Mariñas - Homenaxe aos Pioneiros, unha xornada en que se recoñeceu a importancia do traballo daqueles poucos investigadores e técnicos que nos anos cincuenta e sesenta sentaron as bases do que hoxe é o actual IIM. Foron convidados todos, tamén as súas familias, así como todas as persoas que, malia estaren retiradas da vida activa, seguían a contribuír cientificamente coa actividade do IIM. Para Aida foi unha xornada para o recordo, o reencontro con algúns compañeiros de traballo e, sobre todo, o recoñecemento aos maiores que, co seu bo facer e tesón, marcaron o camiño que seguir para a seguinte xeración de investigadores. Tamén se levou a cabo unha exposición *ad hoc*, organizada

Encontro de Aida Fernández Ríos con participantes arredor da exposición «50 anos de historia do IIM: tal como eramos»

por Xosé Antón Álvarez Salgado, na que se amosaban fotos do instituto e dos seus protagonistas ao longo deses anos («50 anos de historia do IIM: tal como eramos»), e mais un ciclo de conferencias, «O mar a debate», aberto ao público, no que se expuxeron os resultados e quefaceres das principais liñas de investigación.

4. 2006-2011: directora do Instituto de Investigacións Mariñas

4.1. Dirección estratéxica: Plan Estratéxico 2010-2013

Unha das tarefas clave que Aida Fernández Ríos asumiu como directora foi canalizar e coordinar o esforzo colectivo que conduciu á redacción do Plan Estratéxico 2010-2013 do Instituto de Investigacións Mariñas. O documento elaborouse a partir dunha aproximación baseada en liñas de investigación, de modo que os equipos implicados debían identificar e priorizar as súas necesidades, tanto de infraestruturas como de persoal científico e técnico. En paralelo, o plan incorporou unha

definición de necesidades do centro, incluídos os servizos científicotécnicos e de administración, cunha visión transversal orientada a fortalecer a capacidade científica do instituto.

Nun centro multidisciplinario como o IIM, a estratexia consistiu en consolidar as liñas con maior traxectoria e proxección científica, sen perder de vista o impulso a liñas emerxentes que, polo seu potencial innovador, precisaban reforzos específicos en recursos humanos ou equipamento. Ese equilibrio entre a esencia do IIM e novas aproximacións temáticas e metodolóxicas foi un dos elementos que caracterizou o enfoque directivo de Aida.

A elaboración do plan non estivo exenta de dificultades. En particular, detectouse unha falta de motivación nalgúns grupos de investigación, que partían do suposto de que nin a avaliación externa nin os recursos solicitados chegarían a materializarse. Aida tivo que se enfrontar a ese clima de escepticismo e «fatiga institucional» e traballou activamente para reverter o pesimismo, insistindo na necesidade de orientar a planificación cara a obxectivos verificables e de promover unha reflexión estratéxica do instituto a medio e longo prazo. Na nosa experiencia, esa insistencia resultou decisiva para transformar un exercicio que no seu inicio se percibía como burocrático nun proceso útil de reflexión interna.

O plan estratéxico articulouse arredor de oito liñas de investigación, algunhas xa moi consolidadas e outras aínda en fase de maduración. A captación e asignación de recursos ao longo do período contribuíu a reforzar o centro arredor desas liñas, pero tamén a consolidar unha estrutura de servizos científicotécnicos que se crearon ou fortaleceron durante a dirección de Aida. Hoxe, tres deles continúan a ser piares dunha parte substancial da actividade investigadora do IIM: Administración e Outros Servizos Xerais, o Servizo de Acuarios e o Servizo de Instrumentación Científica e Calidade, que integran necesidades transversais do conxunto do instituto. Así mesmo, grazas á xestión de Aida, o Servizo de Embarcacións, cuxa principal infraestrutura era o buque oceanográfico Mytilus, recibiu un financiamento relevante do CSIC destinado á renovación de equipamento científico.

A implantación de sistemas de calidade en procesos administrativos e científicotécnicos foi outro obxectivo explícito do Plan Estratéxico 2010-2013. Esta liña de traballo culminou coa presentación do Plan de Calidade do IIM 2010-2011, que contribuíu a ordenar procedementos, homoxe-

neizar criterios e aumentar a rastrexabilidade interna, aspectos especialmente valiosos nun centro cunha diversidade de actividades e perfís profesionais tan ampla.

No plano externo, Aida mantivo unha política de relacións institucionais orientada a: i) reforzar o contacto con distintas estruturas administrativas e de xestión do CSIC; ii) consolidar vínculos coas universidades galegas; iii) mellorar o acceso a infraestruturas e plataformas mariñas e mais a cooperación asociada, tamén no ámbito internacional, e iv) manter unha interlocución

Aida recolle en marzo de 2006 o Premio Vigueses Distinguidos de mans da daquela alcaldesa de Vigo, Corina Porro

activa co ámbito social e produtivo ligado ao mar. Neste marco, consolidouse a participación do IIM no Campus do Mar, cun papel relevante de coordinación institucional que facilitou a integración de persoal investigador do IIM na súa estrutura.

A participación de Aida en actos institucionais foi particularmente intensa. É de destacar, por exemplo, a súa asistencia, como primeira directora do IIM, á recollida do Premio Vigueses Distinguidos en marzo de 2006, un galardón que outorga o Concello de Vigo a persoas e institucións cunha contribución relevante ao desenvolvemento económico, social ou cultural da cidade. A concesión deste recoñecemento ao Instituto de Investigacións Mariñas reforzou a súa proxección pública e visibilizou a súa contribución a Vigo tras máis de cinco décadas de presenza e actividade.

Un elemento distintivo do seu estilo directivo foi a preparación sistemática coa que abordaba as reunións dos órganos colexiados do IIM, sobre todo as do Claustro Científico e da Xunta de Instituto. Os temas analizábanse antes co equipo directivo, as vicedireccións e a xerencia para valorar a conveniencia, o contexto e as alternativas posibles antes de os elevar aos citados órganos. Esta metodoloxía non só ordenaba os debates, senón que facilitaba a toma de decisións cando o contexto o esixía e contribuía a unha gobernanza máis eficiente e previsible.

4.2. Xestión operativa e infraestruturas

Nun instituto dedicado ás ciencias mariñas, a actividade investigadora depende de forma crítica dunha base operativa complexa: infraestruturas científicotécnicas, instalacións de soporte e equipamento especializado que requiren mantemento continuo, renovación periódica e unha xestión eficiente do uso compartido. Naqueles anos, o IIM contaba cun conxunto notable de infraestruturas: unha embarcación propia —o buque oceanográfico Mytilus (empregado principalmente polos departamentos vinculados á oceanografía e á ecoloxía mariña)—, unha instalación de acuarios, unha planta piloto de procesamento de produtos pesqueiros e varios laboratorios de elevada especificidade (análise instrumental, secuenciación de ADN, radioactividade, sala branca, microscopia e microscopia electrónica, e instalación de bioseguridade). Este conxunto de instalacións e servizos sostiña a investigación dos diversos grupos do IIM, pero tamén implicaba necesidades permanentes de coordinación, investimento e mantemento.

Buque oceanográfico Mytilus e equipamento científico do barco

Aida prestou unha atención sistemática a esa base operativa, sobre todo nos ámbitos que coñecía de primeira man pola súa traxectoria en oceanografía. Como se indicou na epígrafe anterior, durante o seu mandato renovouse instrumentación científica do buque oceanográfico Mytilus mediante financiamento do CSIC, o que reforzou a capacidade do instituto para campañas e mostraxes con equipos actualizados. En paralelo, e de maneira especialmente relevante, durante a súa dirección constituíuse o Servizo de Instrumentación Científica do IIM, dotado de persoal dedicado á súa xestión. Esta decisión tivo un impacto directo na eficiencia do IIM: facilitou o uso compartido de equipos de alto investimento e alta demanda, como cromatógrafos de gases e líquidos, espectrómetros de masas e outra instrumentación transversal, e permitiu ordenar a xestión do equipamento común (autoclaves, cámaras de conxelación, circuítos de auga destilada etc.), o que mellorou a dispoñibilidade, a planificación e a rastrexabilidade do uso.

Amais da modernización do equipamento, durante a súa dirección identificouse outra necesidade estrutural: o crecemento da superficie dispoñible no edificio de Bouzas para despachos e laboratorios. Con ese obxectivo, solicitouse á Secretaría Xeral Adxunta de Obras e Infraestruturas a

autorización para avaliar as posibilidades técnicas de habilitar unha nova planta no edificio principal e de aproveitar o espazo entre os dous edificios para xerar novas áreas de traballo. Chegouse a elaborar un proxecto técnicoarquitectónico; porén, a proposta desestimouse cando colleu forza a posibilidade de dispor de novas instalacións na Escola de Transmisións e Electrónica da Armada (ETEA), o que alteraba a conxuntura e facía recomendable evitar investimentos que axiña poderían quedar desaxustados cunha solución de maior alcance.

Nese contexto enmarcouse a proposta impulsada desde o CSIC para crear o Centro Atlántico de Investigacións Mariñas (CAIM), cuxa sede se localizaría nas instalacións da antiga ETEA do Ministerio de Defensa, en Vigo. O proxecto aspiraba a reunir persoal investigador do CSIC e das universidades nun centro singular de atracción de talento con vocación de referencia internacional. A súa proposta implicaba, na práctica, unha reordenación de capacidades e espazos que afectaba ao IIM: o CAIM orientábase cara a ámbitos máis próximos á oceanografía, á bioloxía e ecoloxía de especies mariñas e mais á acuicultura. De forma paralela, tamén se presentou a idea dun instituto centrado en produtos da pesca e a acuicultura, máis aliñado coa investigación en ciencia e tecnoloxía de alimentos.

Infografía da futura sede do IIM na ETEA segundo o proxecto presentado en 2023

Aida presentou estas iniciativas nunha reunión do Claustro Científico na que se debateu a conveniencia desa segregación. O Claustro expresou de forma maioritaria unha posición contraria e defendeu o valor de manter un instituto integrado. Nese debate, Aida adoptou unha actitude deliberadamente conciliadora: tratou de recoñecer tanto a sensibilidade maioritaria a favor da integración como o argumento dos que entendían que unha eventual segregación non impediría a colaboración científica. Ao final prevaleceu a primeira postura e, ademais, o proxecto quedou abandonado nun contexto marcado pola crise económica que se intensificou a partir de 2010, coa conseguinte contracción do investimento público e, en particular, en novas infraestruturas de investigación.

4.3. Xestión de recursos humanos

Nun instituto científico público, a xestión de recursos humanos é especialmente complexa. Por unha banda, depende dunha oferta pública de emprego limitada; pola outra, unha parte relevante do persoal investigador e técnico está vinculada a contratos asociados a proxectos de investigación e, xa que logo, cun marcado carácter temporal. En consecuencia, malia que durante a dirección de Aida o persoal técnico fixo do IIM medrou, en parte grazas aos procesos de estabilización derivados da denominada lei Caldera (Lei 43/2006), a incorporación de novo persoal investigador e técnico non sempre estivo aliñada coas necesidades estruturais do centro.

A traxectoria de Aida desde a escala técnica levouna a atender de maneira moi particular as necesidades do persoal técnico do IIM. Isto traduciuse, por unha parte, no impulso a melloras laborais e salariais, sempre difíciles de acadar, e, por outra, na súa implicación nos procesos de estabilización promovidos no CSIC. Aida amosouse especialmente combativa neste terreo e tratou de favorecer, na medida do posible, a contratación indefinida da meirande parte do persoal técnico de laboratorio. Os efectos desa liña de traballo fixéronse máis visibles nos anos posteriores, mais supuxeron unha mellora substancial para un instituto en que, tradicionalmente, unha proporción importante do persoal técnico estivera contratada con cargo a proxectos.

Tamén se reforzou de maneira significativa o persoal de servizos xerais, coa incorporación de perfís que impulsaron a xestión económica e administrativa dun centro cunha elevada capacidade de captación de proxectos, sobre todo europeos, e cunha demanda de tramitación e seguimento administrativo cada vez máis complexa.

Así mesmo, Aida coidou de forma constante o seu equipo directivo. Tiña en conta as opinións das persoas que a acompañabamos nesa tarefa e, cando debía ausentarse e delegar funcións, preocupábase por anticipar necesidades e por apoiar as decisións e o traballo cotián. Esa combinación de amabilidade, claridade e actitude positiva facía que mesmo as tarefas menos gratas resultasen máis levadías e, adoito, máis fáciles de abordar.

5. Perfil biográfico persoal

É difícil describir como era Aida Fernández Ríos sen termos a convicción de que o retrato non será fiel ao orixinal, sen que a memoria non se distorza pola emoción e o cariño. Intentaremos facelo repasando algúns aspectos da súa personalidade que admiramos, dos que aprendemos e sobre os que a homenaxe que este ano rende á súa figura a Real Academia Galega de Ciencias nos fixo volver reflexionar.

5.1. Curiosidade científica, curiosidade vital

Xa se falou en epígrafes anteriores da súa traxectoria, primeiro técnica e logo científica e de xestión da investigación. Antes de todo iso, de cada unha das etapas, había sempre unha fase anterior de preparación, de estudo, de aprendizaxe. Aida sempre quería saber, coñecer, comprender. Facíao a todos os niveis e levouno á ciencia, e niso está seguramente a base do seu legado científico e persoal. Aida traballou con grandes científicos desde os seus inicios (baste recordar os doutores Fernando Fraga e Manuel Gómez Larrañeta) e, segundo ela mesma contou nunha entrevista, as cousas que ía aprendendo deles marabillábana e cada vez quería coñecer máis. Esta capacidade de

Aida traballando no despacho de Dirección do Instituto de Investigacións Mariñas (ano 2006)

asombro, a curiosidade científica e o tesón fixeron dela a investigadora que foi. Durante toda a súa traxectoria seguiu formándose en paralelo con moitos compañeiros e formou, así mesmo, numerosos novos científicos; con todos eles (moitos son destacados investigadores mariños na actualidade) continuou colaborando con maior ou menor intensidade.

Recordámola perfectamente en reunións en que escoitaba un punto de vista diferente, un aspecto que quizais non considerara; recordamos a súa «cara de pensar» e o seu «explícame iso». As veces que rexeitaba un tema, unha proposta, unha iniciativa, nunca o facía sen coñecelo antes.

Poderíase dicir que non era rápida en tomar decisións, e iso tamén era consecuencia da curiosidade por coñecer todos os aspectos dun problema antes de tomar algunha medida, por coñecer os puntos de vista dos demais. Cando se trataba de emprender accións que afectaban a situacións persoais ou profesionais de colegas do instituto, sempre empática, trataba de se pór no seu lugar, de ver a situación cos ollos de todas as persoas afectadas.

Ás veces reflexionaba connosco en voz alta e expuña varios puntos de vista sobre un mesmo problema, pois, citando a Joaquín Sabina, de cuxas cancións gozaba moito: «Como te digo una "co", te digo la "o"».

5.2. Entusiasmo e entrega

Malia que Aida participou en trinta campañas oceanográficas e actuou como responsable científica en boa parte delas, na súa vida profesional o termo «embarcarse» non se cinguiu só aos buques oceanográficos. Aventurouse en numerosos retos, persoais e profesionais, asumindo que se ía situar en fronteiras ás que non era frecuente que chegase unha muller con anterioridade. Facíao con coñecemento, sempre, alimentada pola curiosidade de que falamos antes, pero cun entusiasmo contaxioso.

Logo de asumir un desafío (que en numerosas ocasións a levaba a posturas moi reivindicativas ante os que fosen en cada momento os seus superiores e ante ela mesma), Aida puña nel as súas mellores calidades, nunca escatimaba, sabía darlles ás cousas a importancia que tiñan e medir a entrega que requirían (que, pola súa banda, sempre era moi alta).

5.3. Paciencia, tenacidade

Quizais unha das claves do éxito de Aida resida nas palabras que dan título a esta epígrafe. Ela sabía adecuar os tempos á intensidade e evolución dos retos, sabía ver con perspectiva, dosificar, non deixarse levar pola ansiedade da anticipación (facía seu o aforismo «cando cheguemos a esa ponte, xa a cruzaremos», que recordamos que repetía con frecuencia e case sempre cun sorriso).

Emporiso, non era unha muller que abandonase con facilidade. Unha vez que facía súa unha causa (persoal, científica ou de xestión), «tesón» pasaba a ser a palabra que definía a súa relación co problema. Non era raro atopala dándolles voltas aos números, aos datos, aos feitos, buscando formas alternativas de resolver, reflexionando en voz alta connosco, pensando, estudando, escribindo… Quizais non conseguiu todo o que se propuxo (alguén o fai?), pero si a maioría das cousas, e deulle un significado vital (pois foi unha constante na súa vida) á palabra «perseveranza».

5.4. Compañeirismo e amizade

Desde os seus comezos como auxiliar ata as súas últimas etapas como investigadora de referencia internacional, Aida colaborou con centos de persoas, das que sempre aprendeu, pero nas que sen dúbida tamén deixou unha fonda pegada. Por exemplo, a súa produción científica (entre a que se atopan algúns dos artigos máis citados da ciencia en Galicia), malia ser moi persoal, reflicte asemade a súa capacidade de cooperación, como pon de manifesto a súa coautoría con máis de noventa investigadores/as de quince países (datos de ISI WoS, maio de 2026). Se ligamos, por exemplo, este dato ao da súa actividade como directora, co seu compromiso especial coas escalas de persoal técnico, atoparémonos cunha Aida capaz de traballar con moitas persoas, a moitos niveis diferentes, e en todos os casos cun grao notable de éxito. Por que era tan doado traballar con Aida? Cremos que o seu sentido do compañeirismo explica esta circunstancia. Aida era unha defensora do traballo en equipo, solidario. Era a compañeira que sempre estaba para axudar, para resolver, moitas veces para asumir partes do traballo que no inicio non lle correspondían; era a quen se podía recorrer a moitos niveis. Esta era a súa forma de ser, pero tamén había un empeño consciente. Cónstanos que para Aida —e así o demostraban os seus actos— os compañeiros axiña se transformaban en amigos.

Aida compartindo comida co seu vicedirector e vicedirectora
ao finalizar a súa etapa como directora

Aida Fernández Ríos (2015)

5.5. Alegría!

Unha das primeiras actividades de homenaxe a Aida, realizada cando apenas comezabamos a asumir o impacto da súa perda, consistiu en pedirlles aos compañeiros que a coñeceran que escribisen unha frase breve explicando como a recordaban. A palabra máis repetida foi «alegre». E é verdade. Na nosa experiencia, a alegría vital de Aida chegaba a todo, impregnaba os proxectos e as reunións, as comidas ou os cafés compartidos, as longas xornadas en que debiamos afrontar problemas ásperos e que parecían de difícil solución…

Sempre un sorriso. Esa é a imaxe que moitos atesouramos de Aida. Ás veces, no medio do traballo, riamos. Riamos tanto que recordamos comentar: «Que pensaría calquera que nos vise?». E recordaremos sempre a súa resposta: «Non se debe confundir a alegría coa falta de seriedade».

5.6. O «efecto Aida»

Xa o observaramos cando estabamos traballando con ela. E aínda agora, cando nunha conversa descubrimos que alguén a coñeceu e non o sabiamos, asistimos ao «efecto Aida». Observámolo en estudantes, en académicos/as, en persoal técnico ou en persoas que a coñeceron fóra do ámbito científico (un fontaneiro que fixo unha reparación, un alcalde, políticos de diferentes institucións, personalidades do grupo de vigueses distinguidos…). A xente, ao pensar nela, sorrí e conta como a coñeceu, que conversa mantiveron, o que lles dixo do CO_2, do plancto ou do afloramento costeiro, a súa humildade, os seus coñecementos, o seu bo trato, a súa alegría. Esta fascinación é, e seguirá a ser na nosa memoria, o «efecto Aida».

Referencias bibliográficas

CSIC Galicia (2026). Aida Fernández Ríos (CSIC), «Científica Gallega del Año» por la Real Academia Galega de Ciencias (https://delegacion.galicia.csic.es/aida-fernandez-rios-csic-cientifica-gallega-del-ano-por-la-real-academia-galega-de-ciencias/).

DIGITAL.CSIC (s.d.). Historia del Instituto de Investigaciones Pesqueras (IIP) y cronología (1951 / 1952 / / 1979).

Guerra Sierra A., Prego Reboredo R. (2003). El Instituto de Investigaciones Pesqueras. Tres décadas de historia de la investigación marina española. Estudios sobre la Ciencia, Editorial CSIC, Madrid, 344 pp.

Lei 43/2006, do 29 de decembro, para a mellora do crecemento e do emprego.

Real Academia Galega de Ciencias (s. d.). Ficha biográfica de Aida Fernández Ríos (https://www.ragc. .gal/gl/aida-gonzalez-rios/).

RAGC/
REAL ACADEMIA
GALEGA DE **CIENCIAS**