

Itinerarios de cambio técnico: el Instituto de Astrofísica de Canarias como un estudio de caso¹

● MIGUEL SÁNCHEZ PADRÓN Y JUAN SÁNCHEZ GARCÍA²
Universidad de La Laguna

Introducción

En los debates sobre las políticas tecnológica y científica se expresa frecuentemente la necesidad de disponer de una base más clara, y si es posible mensurable, para asignar los recursos de la investigación básica³. Dicha necesidad se ha vuelto más apremiante por la «aparición de una nueva y más estrecha relación

1. Se agradecen los comentarios de los evaluadores de la revista.

2. Este trabajo ha sido elaborado en la University of East Anglia (UEA), Reino Unido, durante la estancia de uno de los autores, Juan Sánchez García, como Investigador Visitante, mientras disfrutaba de una beca de la Consejería de Educación del Gobierno de Canarias. Con el fin de redactar la versión definitiva, Miguel Sánchez Padrón se unió al primero en la mencionada Universidad. Ambos autores agradecen las facilidades proporcionadas por la School of Economics and Social Studies de UEA. Los autores agradecen igualmente la ayuda recibida de Enrique Los Arcos (European Patent Office), Francisco Sánchez, Rafael Rebolo, Manuel Collados, Carmen del Puerto, Rafael Arnay, Margarita Ávila, Ramón García, Jesús Burgos, Campbell Warden y Antonio Mampaso (Instituto de Astrofísica de Canarias) y Steve Davies y Shaun Hargreaves-Heap (UEA). Por estas razones las usuales advertencias sobre la única responsabilidad del autor son algo más que una mera formalidad. Este trabajo ha sido presentado en un Staff Seminar en la School of Economics and Social Studies de la UEA a finales de Septiembre de 1994 y en el VII Simposio de Historia Económica, «Cambio Tecnológico y Desarrollo Económico», celebrado en Barcelona en Diciembre de ese mismo año. En ese contexto queremos agradecer los comentarios favorables del relator, Renato Giannetti de la Universidad de Florencia.

3. Entre los diferentes enfoques que se han utilizado para evaluar la contribución de la investigación básica a la industria queremos señalar los de los siguientes autores: a) Narin y Frame (1989) y Narin y Olivastro (1992), basado en el examen de las patentes, y b) Mansfield (1991). La estimación de la tasa social de retorno de la investigación académica que presenta este último autor para el periodo 1975-1978 es de 28%. Como el propio Mansfield señala, la estimación está basada en cálculos crudos (si bien aparentemente conservadores) y se presenta con propósitos sólo exploratorios y de discusión, «si bien...no es una solución completa o satisfactoria al extraordinariamente difícil y viejo problema de evaluar los beneficios de la investigación académica a la sociedad».

simbiótica entre ciencia y tecnología, convirtiendo la contribución continua de la ciencia a la industria en un aspecto central para la explotación plena de los nuevos avances [...]. Sin embargo no es fácil valorar la situación actual de la investigación básica y su panorama futuro» (OECD, 1987).

Si bien el análisis económico ha ayudado a entender la contribución de la investigación básica a la economía, el coste creciente de aquella debido a la cada vez mayor sofisticación y complejidad de la instrumentación científica, convierte a los gastos en investigación en el primer candidato para el escrutinio en momentos de severas restricciones presupuestarias. El problema se agrava cuando las necesidades de los investigadores en términos de equipos son cada vez más amplias e indivisibles, existiendo por lo común una 'masa crítica' por debajo de la cual los equipos de investigadores no pueden trabajar de forma eficiente.

Sin embargo, los científicos harían bien en tomar nota de los aires de cambio que han estado soplando: «Si la Gran Ciencia resulta incapaz de demostrar otro beneficio que no sea el de proveer una ocupación agradable e intelectualmente satisfactoria para unos pocos miles de investigadores, sus argumentos a favor de continuar consumiendo millones de libras no parecerían, en ese caso, muy sólidos» (Martin e Irvine, 1981). Opinión anticipada, en cualquier caso, por el físico, A. Weinberg (1963), en su contribución básica a la literatura sobre política científica: «Debe ser por motivos más nobles y no sólo por un interés prudente en relación a su propia supervivencia, por lo que los científicos deben adquirir el hábito de examinar lo que hacen desde un punto de vista más amplio del que lo suelen hacer. No hacerlo podría causar una reacción popular que dañaría grandemente a uno de los más notables logros intelectuales de la especie humana -la ciencia moderna-, y a los científicos que la han hecho posible y deben continuar haciéndola posible» (citado en Martin e Irvine (1981)).

Creemos que estas consideraciones por sí mismas proporcionan bases suficientemente sólidas para justificar nuestro interés en el análisis del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), un centro de investigación español, el cual actúa a su vez como observatorio astronómico europeo del Hemisferio Norte. El actual equipamiento astronómico bajo la gestión del IAC lo coloca entre los escalones más altos de los centros de astrofísica en el mundo. Como veremos, las necesidades crecientes de la observación astronómica generan e inducen un continuo desarrollo tecnológico en la instrumentación utilizada para la misma.

Sin embargo, las razones para elegir el IAC como un estudio de caso son, por decirlo de alguna forma, más interesantes desde el punto de vista teórico. El trabajo de campo preliminar proporcionó suficiente evidencia para convertir al IAC en una plataforma de observación excelente para examinar diferentes cuestiones que aún desconciertan a los especialistas en ciencia y tecnología. Desconcierto que se

hace evidente en las frecuentes referencias a vocablos como provisionalidad, poco firme, inestable, que pueden encontrarse en algunos de los trabajos de los principales investigadores sobre el tema:

- «Los economistas teóricos que trabajan en el ámbito del cambio tecnológico no han manifestado en estos últimos años demasiada pasión por cuestiones de política económica» (Dasgupta, 1987).

- «La economía del cambio técnico es una disciplina que está aún seriamente perpleja por el fracaso en su lucha a brazo partido con la inmensa diversidad de los contenidos de la caja negra» (Rosenberg, 1994).

- «Un marco más útil para analizar el proceso de innovación [...] debería estar basado en un mapa de carreteras de las relaciones ciencia/tecnología definido más claramente. El mapa debería, como mínimo, identificar los flujos de tráfico más relevantes entre ciencia y tecnología. Dicho mapa, obviamente, no puede ser dibujado por el momento.» (Rosenberg, 1994).

- «[A continuación se presentan]...cuatro preguntas adicionales, cada una de las cuales es...central en el análisis de la dinámica del cambio técnico:

- ¿Los centros de investigación grandes y eficientes son buenos porque son grandes, o grandes porque son buenos?

- ¿Cuáles son las características de los centros eficientes? ¿Hasta qué punto son resultado de la acumulación de habilidades científicas y gerenciales?

- ¿Cuál es el marco organizacional apropiado para que se produzca tal acumulación?

- ¿Cuáles son los mecanismos a través de los cuales la buena práctica y productividad investigadora es difundida (o no) a través de la comunidad investigadora?

Dado que las bases teórica y empírica son aún poco sólidas, las conclusiones para la política científica son necesariamente provisionales; es por ello por lo que he señalado en todo el trabajo dónde se requería investigación adicional. Las tres materias más importantes (en mi opinión) son:

- los beneficios económicos y sociales de la ciencia 'no estratégica', en particular el desarrollo de redes útiles, capacidades de investigación y aplicaciones no planeadas;

- la naturaleza y los efectos de la internacionalización de las actividades tecnológicas y científicas;

- la estructura, la eficiencia y la dinámica de los sistemas nacionales de investigación básica» (Pavitt, 1991).

Un análisis exhaustivo de los vínculos entre la información obtenida del trabajo de campo en el IAC y los temas de investigación recién apuntados trasciende

los objetivos de este trabajo. En todo caso, para poder hacerlo se requeriría, parafraseando a Rosenberg, un mapa más detallado del IAC del que se dispone por ahora. En otras palabras, se necesita ser capaz de jerarquizar los problemas y elegir las categorías conceptuales más apropiadas para hacer frente a las cuestiones mencionadas. Esto nos coloca, obviamente, en un círculo vicioso. Con el fin de romperlo o, dicho en otras palabras, con el fin de comenzar a recopilar información concreta y detallada en relación al IAC, se ha decidido usar como vehículo de entrada, el análisis de los procesos de innovación de dos instrumentos científicos desarrollados por el Instituto: el espectrógrafo de alta resolución IACUB y el correlador solar IAC. Enfoque que ha de entenderse como mera excusa, como una puerta de entrada en el IAC con el fin de recabar información, más que, y esto conviene subrayarlo, convertirlo en el único objetivo de la investigación. Sin embargo, una vez que se avanzaba con el trabajo, el poder explicativo y analítico de los instrumentos científicos convirtieron a los mismos en objeto de un campo de investigación autónomo.

A la hora de explorar las características de la innovación y desarrollo de los instrumentos antes señalados, el trabajo se estructuró como a continuación se expone. La sección 1 resume la trayectoria histórica del IAC. Esta trayectoria, orientada desde muy pronto por una visión a largo plazo, se traza mostrando la configuración y el desarrollo de los siguientes elementos: identificación y marketing de un recurso científico (la calidad del cielo canario); la atracción de instrumentación científica, la consolidación de la infraestructura técnica del IAC y la transferencia de tecnología; el marco institucional; la importancia del IAC en el contexto internacional. Esta sección termina destacando el papel que han desempeñado los instrumentos científicos en la trayectoria histórica del IAC. La sección 2 se ocupa de los instrumentos científicos en cuanto ejemplo destacado de la concreción material del concepto interfaz ciencia-tecnología, y proporciona unas reflexiones teóricas que ayudan a evaluar la importancia epistemológica de los instrumentos científicos. La sección 3 señala algunas de las características distintivas del I+D en astrofísica; la sección 4 describe, por un lado, los dos casos, ya señalados, de desarrollo instrumental del IAC y, por otro, expone las implicaciones de dicho desarrollo en la trayectoria tecnológica del Instituto; las secciones 5, 6 y 7 examinan algunas de las implicaciones teóricas de la información proporcionada por el trabajo de campo, como son las posibilidades de transferencia o comercialización de los resultados de investigación (sección 5), la información y la tecnología como bien público (sección 6) y la apropiabilidad de este conocimiento a través de las patentes (sección 7). Por último, la sección 8 contiene una relación de cuestiones de política científica y tecnológica y una agenda de investigación futura.

La trayectoria histórica del IAC

El resumen de la trayectoria histórica del IAC tiene que comenzar constatando dos hechos. El primero es que detrás de la fachada externa de un centro de observación astronómico (telescopios y complejos instrumentos científicos) existe además un liderazgo de dirección apoyado en un diseño institucional y de gestión menos visible pero más complejo y sutil, si cabe, que los propios instrumentos científicos necesarios para la investigación astrofísica⁴. Y existe el peligro a la hora de abordar dicha trayectoria histórica, de que la atención se centre en esa fachada externa que por su propia vistosidad y grandiosidad tiende a minusvalorar no sólo lo que significa el «alumbramiento» de cualquier centro de investigación en España sino los delicados problemas de obtención, gestión y desarrollo de recursos físicos, financieros y humanos con los que se enfrenta el fortalecimiento de toda gran instalación científica. Problemas que en el caso del IAC se magnifican si se tiene en cuenta su «juventud», ya que nació con personalidad jurídica propia a partir de embriones existentes, en 1982, tres años después de la internacionalización de los observatorios canarios.

El segundo es que en el área de la astrofísica observacional el desarrollo científico y tecnológico van íntimamente unidos. Esto se debe a que el avance científico en dicha área depende, en buena parte, de un soporte instrumental muy sofisticado que es «retocado y mejorado» de forma casi continua, siendo a veces necesario generar nueva tecnología, generalmente en forma de nueva instrumentación. Esto explica que el IAC haya realizado un esfuerzo considerable para disponer de elementos de infraestructura técnica que le permiten diseñar, desarrollar y fabricar, por sí mismo, parte de la instrumentación necesaria en las observaciones astronómicas. Por esta razón, el IAC ha aumentado de forma permanente su capacidad tecnológica generando nuevos instrumentos y sistemas para la astrofísica que pueden ser utilizados en otros campos y actividades. De ahí que el campo de análisis de la astrofísica cubierto por el IAC proporciona numerosos ejemplos de lo que Rosenberg (1976) denomina mecanismos de inducción. Como este autor ha mostrado de forma exhaustiva, estos mecanismos focalizan la búsqueda de nuevas soluciones y alimentan la generación de tecnología avanzada (instrumentación, sistemas y procedimientos), que tienen aplicación en otros muchos campos científico-técnicos. Nuestra investigación de campo preliminar muestra que la trayectoria histórica del IAC como laboratorio vivo y dinámico permite arrojar luz sobre diferentes cuestiones, tanto en lo referente al desarrollo científico y tecnológico como sobre el diseño y gestión de políticas tecnológicas efectivas.

4. La exposición que sigue se apoya en Sánchez Padrón (1995) y Sánchez Padrón y Sánchez García (1996).

Adentrarse en una gran instalación científica como el IAC supone, por tanto, enfrentarse a una complejidad difícilmente abarcable a través de uno de esos *tour* turísticos superficiales tan característicos de la post-modernidad. De hecho, hay muy poco de efímero y transitorio en el IAC ya que su trayectoria histórica, además de tener que superar oposiciones y avatares, ha estado orientada por una visión a largo plazo, poco frecuente en un contexto sociológico e histórico marcado por el «cortoplacismo». Esta trayectoria, al igual que la de cualquier otra institución de investigación, se puede trazar identificando y siguiendo la configuración, desarrollo y fortalecimiento de cuatro dimensiones: investigación, dirección estratégica, acuerdos de colaboración institucional, y administración, supervisión y gestión interna. Esta trayectoria ha estado jalonada por un conjunto de eslabones paciente y laboriosamente contruidos y que constituyen los pilares sobre los que el IAC ha ido tejiendo su propia historia de forma sinérgica; de tal forma que la constitución y desarrollo de un pilar generaba la situación que forzaba la necesidad de la edificación de los otros pilares. La exposición de esta idea será el vehículo que utilizaremos en nuestro *tour*.

La identificación y marketing de un recurso científico: la calidad del cielo canario

El punto de partida de nuestro *tour* es la siguiente pregunta: ¿se puede comerciar con el cielo? Se podría decir, un tanto metafóricamente, que el IAC nace y se fortalece como una respuesta afirmativa a esa pregunta. Efectivamente, en 1856 el astrónomo británico Charles Piazzi Smyth (1858) demostró que los lugares de gran altitud, y en concreto Canarias, ofrecían claras ventajas para la investigación astronómica⁵. La historia cuenta cómo el profesor Smyth convenció al Almirantazgo Británico para visitar Tenerife, con objeto de comprobar "*how much can astronomical observation be improved by the elimination of the lower part of the atmosphere*". A finales del siglo XIX y principios del XX, Simony, Angstrom, C. Müller y E. Kron y Mascart también efectuaron observaciones. Este último, que vino expresamente en 1910 para observar el paso del Cometa Halley, quedó tan satisfecho de las condiciones de la isla de Tenerife para estas observaciones, que propuso la creación de un observatorio internacional en la montaña Guajara, en los altos de Tenerife.

Con motivo del eclipse de Sol de 1959, visible como total en Canarias, son muchos los astrónomos de todo el mundo que visitan las islas. A raíz de este acontecimiento vuelve a despertarse el interés por instalar en el Teide un observa-

5. Las referencias históricas que siguen se apoyan en F. Sánchez Martínez, "Los Observatorios de las Islas Canarias : un Proyecto de la Comunidad Europea", IAC, La Laguna.

torio permanente. El padre A. Romaña, del CSIC, y el profesor José M^a Torroja, de la Universidad de Madrid, impulsan la idea en España y se inicia el estudio de las condiciones astronómicas de la zona de Izaña (Teide), con el patrocinio de la Universidad de La Laguna y el Cabildo Insular de Tenerife. El Ministro de Educación crea el Observatorio del Teide, bajo la inmediata dependencia del Rector de la Universidad de La Laguna, con carácter provisional, para estudiar las condiciones de la zona, y nombra, en 1959, a José María Torroja director. En 1960 llega a Tenerife Francisco Sánchez (actual director del IAC), para llevar a cabo la prospección astronómica y utiliza como base el Observatorio Meteorológico de Izaña, donde reside con su familia durante cinco años.

En aquella época, los astrónomos no habían llegado a un acuerdo sobre cuáles eran los parámetros que debían usarse para determinar la calidad astronómica de un lugar, ni cuáles deberían ser los procedimientos de medida. El pequeño grupo de astrofísicos españoles que va creciendo en torno al doctor Francisco Sánchez colabora en este empeño internacional, se convence de la calidad astronómica del cielo de Canarias y decide promocionarla fuera y dentro de España.

Los primeros pasos para situar la instrumentación científica en tierras canarias -cimientos del actual IAC- están estrechamente vinculados a la «aventura en común» iniciada en 1964 entre un científico francés (Dr. Dumont, astrónomo del observatorio de la Universidad de Burdeos) y el Dr. Sánchez antes mencionado, bajo el principio de cooperación «tú pones el telescopio, nosotros ponemos el cielo». Así, en 1964, el Dr. Dumont instaló su nuevo telescopio fotopolarimétrico en el Teide con el fin de observar la luz del cielo nocturno. El Dr. Sánchez persuadió al Dr. Dumont para que el telescopio permaneciera en Canarias como apoyo de los servicios del incipiente Observatorio de El Teide siguiendo dicho principio de cooperación. El nuevo telescopio se convirtió en la referencia instrumental del primer grupo de investigación español en astrofísica. El acuerdo se convirtió asimismo en el embrión del futuro Acuerdo de Cooperación Internacional por el que se internacionalizaron los observatorios canarios.

La posibilidad de que el cielo de Canarias fuera el apropiado para la instalación de modernos observatorios astronómicos fue ganando credibilidad entre las instituciones europeas que estaban buscando el mejor lugar para sus nuevos telescopios. Se inicia una campaña internacional con el fin de promover el cielo canario como un punto de reunión para la investigación astronómica comenzándose a persuadir a distintos institutos europeos para que instalen sus nuevos telescopios en suelo canario. Con este fin, a través del decenio de los setenta, y como consecuencia de la campaña de exploración de los sesenta sobre la calidad astronómica del cielo canario y la campaña de marketing subsiguiente, varios institutos de investigación europeos llevaron a cabo su propia exploración, incluyendo las cimas de la isla de La Palma, cimas que más tarde se convirtieron en la localización del Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM). Como consecuencia de

dichas exploraciones internacionales los cielos canarios fueron calificados como excelentes para la observación astronómica. Asimismo, el Observatorio de El Teide (Tenerife) (OT) se convierte en una localización destacada para el estudio del Sol, debido no sólo a la transparencia y a la excelente calidad astronómica del cielo sino también debido a que las Islas Canarias están situadas en una localización geográfica «a mitad de camino» entre los observatorios solares de los hemisferios occidental y oriental, lo que permite observar el Sol en momentos cruciales cuando ya se ha ocultado en un hemisferio y no ha salido aún en el otro. Estas circunstancias han convertido al OT en un lugar privilegiado para la instalación de los mejores telescopios solares e instrumentos europeos.

La constante preocupación por las condiciones de calidad de la observación se convierte en un aspecto estratégico en la fuerte competencia entre Hawai y las Islas Canarias en el proceso de atracción de los nuevos telescopios. Por esta razón, el IAC en 1988 solicita al CCI (Comité Científico Internacional, una de las organizaciones que rige el Acuerdo de Cooperación Internacional en Astrofísica) que establezca un comité *ad hoc* compuesto por astrofísicos de diferentes países (el Subcomité sobre Características de los Lugares), con el objetivo de volver a estudiar la calidad astronómica del cielo canario utilizando la instrumentación más avanzada del momento. La solicitud del IAC fue motivada por el deseo, por un lado, de forzar a los socios europeos a un mayor compromiso y, por otro, de examinar la calidad del cielo para los mayores telescopios del futuro más o menos inmediato. Paralelamente y en conformidad con el Acuerdo de Cooperación Internacional en materia de astrofísica firmado en 1979 entre España y diferentes países europeos, el Parlamento español en 1988 aprueba una ley (31/1988, de 31 de octubre) por la cual se protegen las condiciones astronómicas de los cielos canarios. De esta forma, los cielos canarios se convierten en un «parque científico» mundial para la exploración astronómica⁶.

La atracción de instrumentación, la consolidación de la infraestructura técnica y la transferencia de tecnología

Los avances en astrofísica pasan por disponer de la capacidad de observar objetos muy débiles o muy lejanos con la mejor resolución espacial posible. Ésta depende del diámetro del espejo primario de los telescopios y de los instrumentos auxiliares acoplados a los mismos. Las ventajas comparativas de este mayor po-

6. Bajo esta ley la iluminación exterior, la instalación y funcionamiento de estaciones de radio, la ubicación de industrias y servicios que produzcan contaminación atmosférica, y cualquier otro factor que pueda afectar la calidad atmosférica de los observatorios canarios, están sujetas a restricciones importantes, controladas dichas actividades por una oficina especial del IAC, la OTPC -Oficina Técnica para la protección de la calidad del cielo.

der de resolución son obvias ya que permite una agenda de investigación no sólo más completa y potente, sino también más eficiente; por poner un ejemplo, la observación de objetos muy débiles que requirieran, digamos, ocho horas de observación en telescopios de 4 metros podría hacerse en sólo quince minutos en telescopios de 10 metros. De ahí que una vez definida y legitimada la calidad del cielo de Canarias como activo importante para la investigación astrofísica, su plena explotación requería la instalación de instrumentación e infraestructura de considerable complejidad y coste⁷. Para ello la fórmula inicial «tu pones el instrumento, yo el cielo» establecida con el Dr. Dumont se amplía a otras instituciones. A partir de aquí se produce el acceso e instalación de nueva instrumentación a través de acuerdos internacionales.

Esta fórmula se depura y perfila con el paso del tiempo hasta culminar después de extensas negociaciones llenas de sorpresas y aventuras, en un acuerdo internacional de Cooperación en materia de astrofísica en 1979 entre España, Reino Unido, Suecia y Dinamarca (los contactos oficiales para este acuerdo se inician en 1973, aunque los extraoficiales llevaban años desarrollándose). A dicho Acuerdo van adhiriéndose posteriormente otros países europeos (Alemania, Bélgica, Finlandia, Irlanda, Italia, Noruega y Países Bajos), formando hoy un club de doce países. Este acuerdo se considera de gran trascendencia para el despegue de la investigación astrofísica en Canarias y en el resto de España. Despegue que ha tenido lugar en un tiempo relativamente corto para los estándares de los laboratorios de gran ciencia debido, entre otras razones, al proceso de relocalización de telescopios e instrumentación ya existentes y a la construcción de nueva instrumentación. Todo ello proporcionó a los observatorios canarios (el existente en el Teide y el nuevo en el Roque de los Muchachos) una concentración importante de instalaciones instrumentales de investigación, creando de esta forma condiciones favorables para la consecución de economías de aglomeración y beneficios indirectos en un instituto de gran ciencia. A través de dicho Acuerdo están presentes en los observatorios canarios más de treinta instituciones científicas europeas con sus telescopios e instrumentos.

La cooperación que podrá realizarse al amparo de dicho Acuerdo contempla modalidades como: a) intercambio de información sobre la investigación científica en astrofísica; b) intercambio de científicos, expertos y personal técnico; c) realización común y coordinada de programas de investigación tecnológica; d) utilización común y coordinada de instalaciones científicas o técnicas; e) la instalación y uso de telescopios e instrumentos en los observatorios del IAC. Quizá el botón de muestra más representativo de dicha cooperación sea la regulación de la distribución del tiempo de observación que figura en los protocolos del Acuerdo, y que se expondrá en 1.4, en donde se presentan los indicadores de demanda de dicho tiempo.

7. Las inversiones directas en instalaciones telescópicas en el IAC son del orden de 27.000 millones de pesetas, de los que España ha aportado el 13%.

En el decenio de los ochenta comienza una importante competencia con otros observatorios internacionales con el fin de atraer la nueva generación de telescopios y nueva instrumentación. Los telescopios más avanzados de ese momento se instalaron en los observatorios canarios. En 1983, Alemania firmó el Acuerdo de Cooperación Internacional en Astrofísica. Como consecuencia de ello se instalaron en el Observatorio de El Teide dos nuevos telescopios solares de propiedad alemana. Finlandia y Noruega firmaron el acuerdo internacional en 1986. Se instala en el Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM) uno de los telescopios escandinavos (2,5 m.). En 1987 el IAC firma un acuerdo con varias instituciones científicas alemanas, lo que permitió la instalación de una red de detectores de rayos gamma en el ORM⁸. Francia firmó el Acuerdo en 1988. Como consecuencia de ello se instaló el telescopio solar THEMIS en el OT.

Las ventajas comparativas que proporcionan los telescopios de gran diámetro y su elevado coste explican que exista una carrera entre los centros de observación astronómica internacional para atraer la mejor instrumentación. Un ejemplo de esta competencia es la larga batalla para atraer el mayor telescopio solar del mundo (LEST), de 2,4 m. En esta ocasión, y después de varios años de estudios comparativos, se seleccionó a los observatorios del IAC para su instalación⁹. Otro ejemplo fue la decisión tomada en 1991 por el *Consiglio per la Ricerche Astronomiche* italiano de localizar el telescopio Galileo de 3,5 m. en el ORM, cambiando su idea previa de localizarlo en Hawai. Esta carrera se ha acelerado con la instalación en Mauna Kea (Hawai) de los telescopios Keck I y Keck II de 10 metros de diámetro cada uno. En 1989, el IAC empezó situándose en esta carrera con un proyecto de construcción de un telescopio de 8 metros en colaboración con el *Royal Greenwich Observatory* (RGO). Al retirarse esta última institución del proyecto, el IAC decide retomar el proyecto en solitario ampliando sus dimensiones a un telescopio óptico infrarrojo de 10 metros. Con el fin de abordar este reto, el Consejo de Dirección del IAC encargó a GRANTECAN S.A., empresa pública canaria creada *ad hoc* para este proyecto, el estudio de viabilidad del mencionado telescopio¹⁰. El inicio del diseño y construcción del telescopio ha sido aprobado por los gobiernos español y canario a principios de 1996. Asimismo, el Consejo Rector del IAC ha encargado a GRANTECAN S.A. la gestión del diseño, construcción e instalación en el ORM del Gran Telescopio¹¹.

Durante el decenio de los ochenta se consolida la actividad tecnológica de I+D del IAC mediante el establecimiento de laboratorios y talleres de óptica, mecánica,

8. La red se convirtió en uno de los experimentos más avanzados para detectar el origen de las partículas cósmicas más energéticas.

9. Hoy pendiente de financiación.

10. Este estudio consta de distintos informes. Los autores de este trabajo han participado en dicho estudio como codirectores del informe, «Estudio sobre los factores económicos y de política científica y tecnológica relacionados con la construcción del Telescopio» (1995), realizado en el marco de un convenio firmado entre la Universidad de La Laguna y GRANTECAN S.A.

11. Se tiene previsto que entre en operación en el año 2003 y el coste estimado es de alrededor de 12.000 millones de pesetas de 1994.

informática, electrónica, revestimiento óptico, fibra óptica, fotografía, metrología y microdensitometría que permiten tanto el diseño y construcción de instrumentación astronómica como otro tipo de instrumentación (por ejemplo, aparatos de concentración calorífica, termostatos, instrumentación oftalmológica, técnicas para la generación de modelos digitales del territorio,...). Ello le permitió al IAC poner en funcionamiento un marco de transferencia tecnológica con su entorno. Por un lado, estableció una oficina para la transferencia de resultados de investigación (OTRI), la cual forma parte de la Red OTRI/OTT de la Comisión Interministerial Española de Ciencia y Tecnología. Por otro lado, al final de los 80, se funda la compañía Galileo Ingeniería y Servicios S.A. como una aventura en común entre el IAC, Banco Bilbao -en aquel entonces-, Caja Canarias e Iberduero Corporación, con la intención de rentabilizar las ganancias potenciales del I+D del IAC. Actualmente el IAC funciona asimismo como centro de homologación y certificación europeo.

El IAC se involucra igualmente en el campo espacial europeo. El IAC desarrolla y construye diferentes espectrofotómetros para llevar a cabo investigación espacial, incorporados en cohetes espaciales de sondeo españoles. Tales espectrofotómetros fueron la primera instrumentación de este tipo desarrollada en España. El IAC asimismo diseña y construye el ISOPHOT-S, un instrumento incorporado al satélite ISO (*Infrared Space Observatory*) de la Agencia Espacial Europea -el primer instrumento español utilizado en un satélite de dicha Agencia. Esta labor de investigación espacial la continúa durante el decenio de los 90 mediante la participación en los instrumentos VIRGO y GOLF del satélite de la Agencia Espacial Europea, SOHO.

El marco institucional

El crecimiento y desarrollo científico del IAC ha ido acompañado por una transformación de su marco institucional. Así el embrión jurídico del IAC, creación del Observatorio del Teide en 1959 ya mencionado, da paso a las siguientes figuras: Instituto Universitario de Astrofísica (Marzo de 1973) e Instituto de Astrofísica de Canarias (Octubre de 1975). Sin embargo, las figuras jurídicas anteriores (*convenio entre entidades patrocinadoras*) no eran las más adecuadas tanto para la gestión de los Observatorios Internacionales como para el desarrollo de otras funciones (palanca eficaz del desarrollo de la investigación Astrofísica y la tecnología asociada). De hecho el Instituto carecía de personalidad jurídica diferenciada.

Las negociaciones y el “pulso” entre las distintas instituciones nacionales, autonómicas y científicas desempeñaron un papel decisivo en el desarrollo subsiguiente del IAC, ya que el resultado de ellas permitió al Consejo de Dirección del IAC adoptar una posición descentralizada, logrando que éste se localizara cerca del re-

curso científico (el cielo canario), de los instrumentos científicos y de los investigadores. A lo largo de estas negociaciones el marco institucional es identificado como un factor clave para el desarrollo posterior del IAC, puesto que permitiría abordar con más autonomía las futuras reformas legales y administrativas que iban a ser necesarias para el desarrollo del Acuerdo de Cooperación Internacional en Astrofísica que se firmó en 1979. Por esta razón, un informe jurídico del Departamento de Derecho Administrativo de la Universidad de La Laguna propone que se dote al IAC por ley de una nueva personalidad jurídica y plena capacidad de obrar.

El modelo jurídico y organizativo finalmente adoptado es el de «Consortio Público de Gestión, cuya finalidad es la investigación astrofísica, integrado por la Administración del Estado, la Comunidad Autónoma de Canarias, la Universidad de La Laguna y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas» (R.D. Ley 7/1982 de 30 de Abril)¹². A este respecto se consideró que el consorcio es una figura jurídica adecuada en aquel momento por las siguientes razones: a) posee personalidad jurídica; b) reúne administraciones públicas de diferente orden; c) es una figura flexible en cuanto a tramitación y clausulado; d) bajo esta figura puede aprovecharse gran parte de la organización derivada del convenio de 1975.

La forma actual del IAC se inaugura oficialmente en Junio de 1985. Posteriormente, la Ley española de la Ciencia de 1986 reconoce en su articulado al IAC como un caso especial (Disposición Adicional Undécima de la Ley 13/1986, de 14 de abril, de Fomento y Coordinación General de la Investigación Científica y Técnica). Esta disposición adicional condujo a un nuevo Real-Decreto (795/1989, de 23 de junio, BOE 158, 4 julio 1989) mediante el cual se adaptó la organización y funcionamiento del IAC a la nueva ley.

El Consorcio Público Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) está constituido por el Instituto de Astrofísica de Canarias en La Laguna y el Observatorio de El Teide, ambos en Tenerife, y el Observatorio del Roque de los Muchachos en la isla de La Palma. El Consorcio Público IAC tiene dos órganos ejecutivos: (i) el Consejo de Gobierno del IAC que decide las políticas administrativa y financiera; consta de los siguientes miembros: el Ministro de Educación español; un representante del Ministro de la Presidencia español, el Rector de la Universidad de La Laguna, el Presidente del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), y el Director del IAC; (ii) la Dirección del IAC que es quien decide sobre la política científica y tecnológica. Existen diversos comités de asesoramiento, de los cuales los más importantes son: el Comité de Gestión y el Consejo de Evaluación de la Investigación (máximo órgano de asesoramiento en relación a las políticas tecnológica y científica, compuesto por astrónomos procedentes de diferentes partes del mundo). El IAC está subdividido en cuatro divisiones diferentes de acuerdo con sus objetivos: Investigación, Tecnología (Instrumentación), Estudios de Postgrado y Administración.

12. Tal Real Decreto-Ley se desarrolla en el Real-Decreto 2678/1982, de 15 de octubre (BOE núm. 259, 28 octubre 1982), mediante el cual se determina la estructura orgánica del Instituto.

Los objetivos del IAC son: 1) desarrollar y promover la investigación en astrofísica y campos afines; 2) gestionar los observatorios e instalaciones astronómicas existentes y aquéllas que puedan crearse o incorporarse bajo su administración; 3) desarrollar las relaciones con las comunidades científicas internacional y nacional; 4) colaborar con la universidad y con la educación especializada en la formación de personal científico y técnico en todos los campos relacionados con la astrofísica; y 5) popularizar el conocimiento astronómico.

Otra dimensión del marco institucional es el procedimiento por el que se establece la agenda de investigación del IAC. Con este fin en 1983 el IAC organizó una reunión con un reducido número (12) de expertos astrofísicos internacionales, con experiencia en el campo de la gestión de institutos de investigación. De dicha reunión surgió un análisis crítico del IAC y una agenda de investigación para el futuro. Las conclusiones de esta reunión se recogieron en un memorándum: «Recomendaciones sobre el futuro de la investigación en el IAC» (1983). Este memorándum se convirtió en un punto de referencia para las investigaciones científicas y técnicas, ampliándose la agenda de investigación del IAC, y constituyéndose nuevos grupos de investigación derivados de los grupos existentes. En septiembre de 1996, la Comisión Asesora de Investigación (CAI)¹³ ha realizado una nueva auditoría científico-técnica.

Con el fin de proporcionar una visión 'material' de la evolución histórica del IAC se recoge a continuación, en el Cuadro 1, una serie histórica de gastos del Instituto que abarca un periodo de nueve años, desde 1987 hasta 1995. Las cifras de dicho cuadro indican la evolución de los conceptos de Inversiones (proyectos de investigación, proyectos de I+D, dotación de talleres, laboratorios e instalaciones telescópicas), Personal (nómina, Seguridad Social, productividad y Acción Social) y Funcionamiento (mantenimiento de edificios y equipos, reparación y conservación de máquinas, soporte administrativo y operacional) del IAC.

CUADRO 1

EVOLUCIÓN DE LOS GASTOS DEL IAC 1987-95 (MILLONES DE PESETAS CORRIENTES)

	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
Personal	172,00	246,00	328,00	425,00	479,00	575,00	634,00	695,00	761,00
Funcionamiento	101,00	122,00	128,00	152,00	156,00	173,00	209,00	189,00	189,00
Inversiones	454,00	365,00	464,00	698,00	796,00	893,00	659,00	773,00	649,00
TOTAL	727,00	733,00	920,00	1275,00	1431,00	1641,00	1502,00	1657,00	1599,00

Fuente: Memoria IAC (varios años), Programa Sectorial "Potenciación y explotación del Complejo Astrofísico Internacional de Canarias" IAC 1987 y Distribución de los presupuestos anuales.

13. Comisión presidida por el Director del IAC y constituida por cuatro personas de reconocido prestigio científico, que son renovados escalonadamente de forma que su permanencia continuada en la CAI no sea mayor a cuatro años. También son miembros el Secretario del Plan nacional de I+D, o persona en quien delegue y un representante de la Comisión Nacional de Astronomía.

Los aspectos más relevantes de este Cuadro son los siguientes :

1) Un crecimiento paulatino de los gastos de Personal, que pasan de significar el 23,6% de los gastos en 1987 a convertirse en el 47,6% en 1995. Las plantillas, en general, se han diseñado y se han ido ocupando procurando mantener la relación :

1 investigador/2 técnicos/0,5 administrativos.

2) Un sensible mantenimiento durante el periodo analizado de los gastos de Funcionamiento, oscilando éstos en términos porcentuales entre el 10,5 en 1992 al 16,6 de 1988 de los gastos totales. Los gastos de funcionamiento tratan, en última instancia, de adaptarse al mantenimiento de las inversiones realizadas en edificios y material inventariable.

3) Por lo que se refiere a las Inversiones es necesario tener en cuenta que esta partida incluye los gastos financiados por el capítulo VI del presupuesto del IAC y los gastos asociados a las operaciones comerciales. Dicho capítulo VI recoge una parte de la financiación de proyectos del IAC (material inventariable, fungible, becas, viajes y bolsas) y el equipamiento de talleres y laboratorios cuando se refiere a material inventariable. Como operaciones comerciales se contemplan las siguientes actividades: a) la administración de los observatorios internacionales cuya financiación se regula en los Acuerdos de Cooperación Internacional; b) los convenios y contratos formalizados con entidades públicas o privadas, los proyectos de financiación financiados con fondos extrapresupuestarios (agencias financiadoras nacionales o internacionales, entidades privadas) y la venta de bienes y/o servicios. El Cuadro 2 proporciona la evolución de dichos componentes:

CUADRO 2
EVOLUCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL CAPÍTULO DE INVERSIONES
(CAP.VI Y OPERACIONES COMERCIALES)

	Inversiones cap.VI		Operaciones comerciales		Total Inversiones		Total Presupuesto IAC	
	millones ptas	%	millones ptas	%	millones ptas	%	millones ptas	%
1987	358	49,2	96	13,2	454	62,4	727	100
1988	249	34	116	15,8	365	49,8	733	100
1989	333	36,2	131	14,2	464	50,4	920	100
1990	532	41,7	166	13,1	698	54,8	1275	100
1991	575	40,2	221	15,4	796	55,6	1431	100
1992	664	40,5	229	13,9	893	54,4	1641	100
1993	326	21,7	333	22,2	659	43,9	1502	100
1994	206	12,4	567	34,2	773	46,6	1657	100
1995	169	10,6	480	30	649	40,6	1599	100

Fuente : Programa Sectorial "Potenciación y explotación del Complejo Astrofísico Internacional de Canarias" IAC 1987 y Distribución de los presupuestos anuales.

Sin embargo, a efectos de gestión y control, el presupuesto del IAC se divide, asimismo, en los siguientes grupos orgánicos : Dirección, Gabinete, Investigación, Instrumentación, Enseñanza, Administración general, Observatorio del Roque de los Muchachos, Observatorio del Teide, Centro de Cálculo y Biblioteca. Las actividades del grupo de Instrumentación son las de proporcionar el soporte tecnológico al IAC, realizar investigación y desarrollo tecnológico y dar asistencia técnica y servicios a terceros mientras que las principales actividades realizadas por el grupo de Investigación son las de realizar investigación astrofísica (proyectos de investigación) y mantener operativos y actualizados los telescopios e instrumentos de observación. La evolución de los gastos de los grupos de Investigación e Instrumentación dentro del capítulo total de Inversiones se recogen en el Cuadro 3.

CUADRO 3
EVOLUCIÓN DE LOS GASTOS DE LOS GRUPOS INVESTIGACIÓN
E INSTRUMENTACIÓN DEL CONCEPTO INVERSIONES

	Instrumentación		Investigación		Total Inversiones IAC	
	millones ptas	%	millones ptas.	%	millones ptas	%
1987	119,21	26,3	48,19	10,6	454	100
1988	130,68	35,8	44	12,1	365	100
1989	209,4	45,1	66,37	14,3	464	100
1990	351,3	50,3	97,46	14	698	100
1991	401,11	50,4	135,11	17	796	100
1992	117,99	13,3	553	62,2	889,02	100
1993	129,14	19,7	190,17	29,1	654	100
1994	128,71	16,8	239,7	31,2	768	100
1995	119,05	18,5	229,64	35,7	643,73	100

Fuente : Programa Sectorial "Potenciación y explotación del Complejo Astrofísico Internacional de Canarias" IAC 1987 y Distribución de los presupuestos anuales.

4) En el Cuadro 3 se pueden distinguir dos etapas. Una asociada al crecimiento inicial del grupo Instrumentación hasta 1991 como consecuencia, principalmente, del énfasis puesto en la creación de infraestructura y la dotación de maquinaria y equipos en el IAC, y otra asociada a la evolución del grupo de Investigación en el que se produce un crecimiento paulatino, apoyado éste en la creciente disponibilidad de infraestructura científica y técnica; en 1992 se produce un pico como consecuencia de la incorporación del IAC en proyectos espaciales (por ejemplo, los proyectos de instrumentación VIRGO y GOLF para el satélite de la Agencia Espacial Europea, SOHO).

5) Estas etapas se reflejan a su vez en el Cuadro 2 que recoge la evolución de los componentes de las inversiones (cap.VI y operaciones comerciales) ya que,

por un lado, se produce una disminución de los gastos del cap.VI, dirigidos fundamentalmente a la financiación interna de los proyectos de I+D y a la creación de infraestructura y, por otro, se produce un aumento de los gastos tipificados como operaciones comerciales, gastos que son consecuencia fundamentalmente de la financiación externa de proyectos de I+D (que posibilita asimismo la adquisición de maquinaria y equipo ligados a dichos proyectos). Esta evolución es, en última instancia, el resultado de la política seguida por el IAC en el sentido de que los gastos iniciales (1987/92) dedicados a la creación de infraestructura y dotación de equipos tanto en la sede central como en los observatorios creasen la capacidad científica y tecnológica que atrajese fondos externos para la financiación de proyectos de I+D y para el mantenimiento actualizado y competitivo de las instalaciones y equipos. Como consecuencia de ello y dado el carácter finalista de la financiación externa, un aumento de ésta implicaría una tendencia a que sobrevivan aquellos proyectos de investigación más competitivos que sean capaces de atraer más recursos.

La importancia del IAC en el contexto internacional

En este epígrafe presentamos un conjunto de indicadores tanto de índole cualitativa como cuantitativa que proporcionan información sobre los siguientes puntos: a) la importancia del IAC como centro de investigación en general y, b) sobre su posición en el concierto mundial de observatorios, así como su dinamismo científico y técnico. En relación con el primer punto, un indicador relevante es que el IAC, junto con otros tres centros españoles, fue seleccionado por la CE en 1993, dentro del Programa de Capital Humano y Movilidad, para acoger a científicos de otros países comunitarios por un periodo de dos a tres años. Esta selección es el resultado de una evaluación en la que es decisiva la calidad científica de las solicitudes ya que no existen cuotas nacionales definidas *a priori*. Las entidades seleccionadas suelen caracterizarse por ser centros con gran calidad en las investigaciones que realizan y por ser instalaciones únicas en su especialidad. Este Programa tiene por tanto un carácter absolutamente competitivo: los países de la CE propusieron un total de 94 centros científicos, de los que sólo se aceptaron 47. De ahí la denominación de "centro de excelencia" a las entidades seleccionadas. Actualmente, en el ámbito de la Unión Europea el único otro centro de excelencia de astrofísica a efectos de este Programa, es el *Joint Institute for VLBI in Europe (JIVE)*, en Holanda.

En cuanto al segundo punto, la situación del IAC en el concierto mundial y su dinamismo científico, nos ha parecido conveniente distinguir un conjunto de indicadores de oferta y demanda. La interpretación de estos indicadores requiere,

sin embargo, conocer la regulación de la distribución del tiempo de observación que figura en los protocolos del Acuerdo de Cooperación Internacional. A saber: a) España dispondrá, libre de gastos, al menos, del 20% del tiempo de observación de cada uno de los telescopios e instrumentos instalados en los observatorios (conocido como tiempo CAT); b) la asignación de, al menos, un cinco por ciento adicional del tiempo de observación para la realización de programas cooperativos entre las instituciones usuarias, incluyendo el IAC (conocido como tiempo internacional, TI).

Oferta

Respecto a la dotación instrumental se considera que el ranking mundial está liderado por Hawai seguido por los observatorios del IAC y por el Observatorio Europeo del Hemisferio Sur (ESO)¹⁴. En cuanto a la observación solar, sin embargo, al Observatorio del Teide se le considera como el observatorio solar más completo del mundo. El Cuadro 4 que sigue proporciona información de la principal instrumentación de los Observatorios del IAC y del Observatorio de ESO.

Esta instrumentación le permite al IAC ofertar 2700 noches de observación (telescopios nocturnos) y 1600 días de observación (telescopios solares) por año. Según los términos del Acuerdo mencionados al principio de este epígrafe, el 75% de esta oferta corresponde a la institución propietaria del instrumento, el 20% es tiempo CAT y el 5% es tiempo TI.

La accesibilidad a esta oferta de tiempo de observación está facilitada por la condición que tiene el IAC de ser "centro de excelencia" a efectos de los Programas Marco de Investigación y Desarrollo Tecnológico¹⁵. En concreto, dentro de la Cuarta Actividad del IV Programa Marco, Formación y Movilidad de Investigadores, y a través del área Acceso a Grandes Instalaciones, la UE ha financiado mediante un contrato para el periodo 94-95, el proyecto del 5% de Tiempo Internacional disponible en los observatorios canarios. Este segmento de tiempo cuenta con unas características que lo hacen único: este porcentaje se puede traducir en un número importante de noches por proyecto que no ofrece ningún otro observatorio (por ejemplo, se ha dispuesto de hasta 60 noches por un proyecto) y en la posibilidad de utilizar diferentes telescopios simultáneamente. A título de ejemplo, este contrato con la UE ha permitido financiar 7 proyectos, en los que han estado involucrados 173 astrónomos de 62 instituciones diferentes¹⁶. El contrato

14. ESO es una organización multinacional de 8 países europeos, que opera los telescopios instalados en La Silla (Chile) y cuya sede central está en Munich (Alemania).

15. La condición de "centro de excelencia" obliga al IAC a estar sujeto a auditorías científico-técnicas por parte de la UE.

16. 18 institutos británicos, 5 españoles, 5 franceses, 7 alemanes, 6 italianos, 4 holandeses, 1 noruego, 3 suecos, 2 finlandeses, 1 griego y 10 no comunitarios.

CUADRO 4
DOTACIÓN DE TELESCOPIOS DEL IAC Y DEL ESO

IAC	ESO
Telescopio solar Newton al vacío (VNT) 0.4m	Telescopio Nueva Tecnología (NTT) 3.5m
Telescopio solar Gregory Coudé (GCT) 0.45m	Telescopio 3.60m
Telescopio Reflector 0.5m	Telescopio Auxiliar Coudé (CAT) 1.4m
Telescopio solar de torre al vacío (VTT) 0.6m	Telescopio ESO 2.2m
Telescopio solar Themis 0.9m	Telescopio Danés 1.54m
Telescopio solar holandés abierto (DOT) 0.45m	Telescopio ESO 1.52m
Telescopio Óptico 0.6m	Telescopio Schmidt
Telescopio Jacobus Kapteyn (JKT) 1m	Telescopio Holandés 0.9m
Telescopio Isaac Newton (INT) 2.5m	ESO 0.5m Telescope
Telescopio Nórdico (NOT) 2.56m	Radio Telescopio Submilímetro
	Sueco-ESO (SEST) 15m
Telescopio Nacional Italiano Galileo (TNG) 3.58m	Telescopio Muy Largo (VLT) ¹
Telescopio William Herschel (WHT) 4.2m	
Telescopio IAC 0.8m	
Telescopio Infrarrojo Carlos Sánchez (TCS) 1.55m	
Telescopio Óptico-infrarrojo (GTC) 10m (proyecto aprobado)	
Telescopio Estación Óptica Terrestre (OGS) 1m	
Radiotelescopios de doble antena	
Círculo Meridiano 0.18m	
Refractor solar VRT	
Red de detectores de rayos cósmicos (HEGRA)	

Notas : (1) Una serie de cuatro telescopios de 8m. cada uno que pueden funcionar de forma individual o combinada (en construcción)
Fuente : Memoria IAC 1995 y www.hq.eso.org/eso-homepage.ht

con la UE para el periodo 1996-98 ha ampliado la subvención y el apoyo a todo astrónomo que utilice un telescopio no operado por la institución de la que procede, independientemente del segmento de tiempo que utilice.

Demanda

Un indicador de dinamismo del Instituto y sus observatorios es la demanda de tiempo de observación por parte de los astrofísicos. La comunidad de astrofísicos españoles ha usado intensamente los telescopios en los observatorios del IAC, siendo la demanda de noches de observación muy superior al número de noches disponibles cada año. La Sala Nocturna del Comité de Asignación de Tiempo de observación (CAT) recibió en 1996 230 propuestas de observación para los cinco telescopios que a continuación se indican :

- Observatorio del Teide (Tenerife):
 - Telescopio Carlos Sánchez (TCS). Propiedad del IAC. En este telescopio España dispone del 95% del tiempo de observación (más la posibilidad del 5% adicional en proyectos de cooperación internacional).
- Observatorio del Roque de los Muchachos (La Palma):
 - Telescopio Jacobus Kapteyn (JKT). Propiedad del *Particle Physics and Astronomy Research Council* (Reino Unido).
 - Telescopio Isaac Newton (INT). Propiedad del *Particle Physics and Astronomy Research Council* (Reino Unido).
 - Telescopio William Herschel (WHT). Propiedad del *Particle Physics and Astronomy Research Council* (Reino Unido).
 - Telescopio Óptico Nórdico (NOT). Propiedad del *Nordic Optical Telescope Scientific Association* (Países Nórdicos).

De las 230 propuestas presentadas, 113 obtuvieron tiempo, lo que representa un factor de sobresuscripción de alrededor de 2. La presión sobre los distintos telescopios es, sin embargo, muy desigual, siendo los de mayor diámetro los que, lógicamente, sufren un mayor factor de sobresuscripción (ver Cuadro 5), factor que puede alcanzar un valor de 5-7 (referido al número de noches solicitadas/noches disponibles) en los telescopios con mayor demanda (el WHT y el INT)¹⁷.

Las propuestas presentadas son calificadas por los evaluadores externos y los miembros del CAT de acuerdo con la siguiente escala que va de 1 (máxima prioridad) a 4 (mínima) :

La propuesta es excepcional y debe realizarse (1).

La propuesta tiene interés científico, fácilmente podrá resultar en una contribución significativa (2).

La propuesta es susceptible de obtener resultados de interés científico, pero existen dudas (3).

17. A efectos comparativos podemos mencionar que el factor de sobresuscripción correspondiente al Observatorio ESO oscila entre 1.6 y 3.8 y que en el telescopio espacial Hubble este factor se sitúa entre 6 y 6.5.

CUADRO 5
FACTOR DE SOBRESUSCRIPCIÓN DEL TIEMPO CAT EN LOS OBSERVATORIOS DEL IAC

SEMESTRE CAT -96A	WHT	INT	JKT	NOT	CTS
Nº de prop. presentadas	27	28	9	17	15
Nº de prop. aprobadas	15	9	7	10	14
FACTORES	1.8	3.1	1.2	1.7	1.0
Nº de noches solicitadas	B 27	20	9	24	
	G 20	53	28	9	
	O 36	59	27	40	
Nº de noches aprobadas	B 13	19	16	7	
	G 7	6	5	19	
	O 13	11	12	12	
FACTORES	B 2.1	1.1	0.6	3.4	
	G 2.9	8.8	5.6	0.4	
	O 2.8	5.4	2.3	3.3	

SEMESTRE CAT -96B	WHT	INT	JKT	NOT	CST
Nº de prop. presentadas	55	29	7	15	28
Nº de prop. aprobadas	15	9	5	9	20
FACTORES	3.6	3.2	1.4	1.6	1.4
Nº de noches solicitadas	B 58	34	4	15	
	G 49	40	6	19	
	O 64.5	61	29	34	
Nº de noches aprobadas	B 11	10	14	8	
	G 9	11	9	17	
	O 9	7	10	8	
FACTORES	B 5.3	3.4	0.3	1.9	
	G 5.4	3.6	0.7	1.2	
	O 7.2	8.7	2.9	4.2	

Notas: (1) Cada factor representa el cociente de las cifras que anteceden

(2) (B= Brillantes G= Grises O= Oscuras)

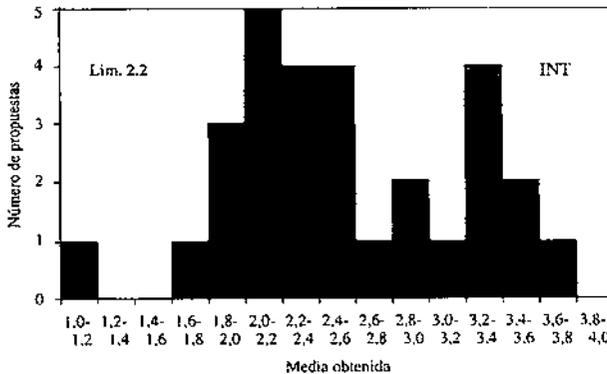
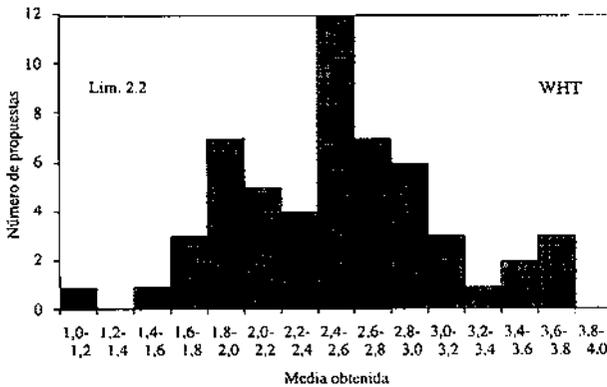
Fuente : Publicación interna del CAT (IAC).

La propuesta flaquea en el tratamiento científico, o es repetitiva de trabajos previos, o es de dudosa calidad, o no es factible en el momento, y por tanto, en la forma que se presenta, ha de ser rechazada (4).

Cada propuesta recibe una calificación del 1 al 4, con pasos de 0.5. La calificación final es la media aritmética de la calificación de los siete miembros del CAT, y es lo que se representa en el Gráfico 1. La asignación de tiempo se inicia por las propuestas con mejor calificación y continúa hasta que se agotan las noches disponibles (oscuras, brillantes y grises). Este límite, a partir del cual una propuesta ya no alcanza tiempo, oscila típicamente entre 2.2 y 2.5.

GRÁFICO 1
CALIFICACIÓN DE LAS PROPUESTAS CIENTÍFICAS PARA LA UTILIZACIÓN DEL TIEMPO CAT

Valoración de las propuestas (semestre 96B)



Fuente: Publicación interna del CAT (IAC)

Un indicador del grado de aprovechamiento del tiempo de observación que corresponde a los diferentes países, se puede obtener comparando el porcentaje de artículos publicados por autores de cada país usuario, directamente relacionados con observaciones realizadas en estos telescopios. En caso de artículos con colaboración internacional, la parte que corresponde a cada nacionalidad se calcula dando el mismo peso a todos los autores del artículo. Los artículos escritos utilizando observaciones realizadas en los telescopios del *Isaac Newton Group* localizados en Canarias durante 1984-92 es del 23,6%, superior al porcentaje de tiempo de observación que corresponde a España.

La evolución de los artículos en revistas internacionales con árbitros (ARIA) da asimismo un perfil del dinamismo de la Institución. El total de publicaciones ARIA desde 1966 hasta 1995 de miembros del IAC ha sido 676. Hasta el año 1995, ha tenido un índice promedio de 7,6 citaciones por artículo. Algo más del 90% de dicha producción se ha generado a partir de 1986.

Como conclusión de esta sección queremos destacar el papel relevante que han desempeñado los instrumentos científicos en el desarrollo y fortalecimiento del IAC. Así :

1) La instrumentación científica sirvió para definir un recurso científico no ubicuo (el cielo canario) para llevar a cabo una actividad científica (astrofísica).

2) La instrumentación científica se convirtió en el 'bien de capital' para la formación del personal técnico y científico del IAC.

3) De la considerable concentración de instrumentos científicos en los observatorios canarios se derivaron economías de aglomeración científica y tecnológica.

4) El IAC ha producido una serie completa de instrumentos científicos en su división de Tecnología, y está dirigiendo el diseño y la construcción de un telescopio de 10 m.

El carácter estratégico de la instrumentación científica y su identificación como concreción material del concepto interfaz ciencia-tecnología, o si se quiere, ejemplo paradigmático de dicho interfaz, anima a realizar en el epígrafe que sigue unas reflexiones teóricas que ayudan a evaluar la importancia epistemológica de los instrumentos científicos.

Los instrumentos científicos y el desarrollo tecnológico: el papel de las necesidades de los usuarios

La concepción de la tecnología como algo separado de la ciencia está siendo progresivamente rechazada por los historiadores de la tecnología. En el proceso de discernir aquellos elementos que deben entrar en una historia dinámica de la

ciencia, Ackerman (1985) destaca la interacción contemporánea entre teoría y hecho científico como el resultado de una interacción entre el científico y el mundo, percibido éste a través de la instrumentación científica. Circunstancia que si bien nos sugiere que la ciencia y la tecnología pueden entenderse como algo conceptualmente diferente, ello sería hasta cierto punto secundario, ya que la ciencia moderna contiene en su *instrumentarium* un importante componente tecnológico. Como señala Greenaway (1978), «la desaparición gradual de la distinción entre ciencia y tecnología no está mejor ilustrada en otro lugar que en este campo [de la instrumentación]».

Efectivamente, el instrumento científico rompe la línea de influencia desde la interpretación a la observación, o desde la teoría al hecho científico. Los instrumentos son piezas importantes en la definición de las fronteras o bordes de la ciencia. Los instrumentos funcionan como intermediarios epistémicos entre las teorías y los datos¹⁸. De dicha concepción surge una dependencia mutua entre diseño instrumental y progreso teórico. Los instrumentos generan nuevos datos, algunos de los cuales llegan a convertirse en hechos científicos legitimados. Esta epistemología genera una importante retribución filosófica: una habilidad perfeccionada para caracterizar la naturaleza progresiva de la ciencia, sin olvidar que «para la ciencia moderna la experiencia de la naturaleza está mediada por los instrumentos, los cuales son perfeccionados de conformidad con estándares científicos» (Böhme *et al.*, 1978). El resultado de todo ello se traduce en un interés sobre el proceso de creación de los instrumentos científicos.

De forma natural los científicos conciben los instrumentos modernos como procesadores de información. Los instrumentos son estudiados en términos de flujos de información. Si bien las señales (generadas por la fuente de información) son funciones del tiempo, el flujo de señales tratado a través de un instrumento ha de considerarse tanto una función del tiempo como una función del grado de refinamiento de la información (Bair, 1962). Desde esta perspectiva muchos instrumentos funcionan como sistemas complejos que detectan, procesan y transforman la información generada por un suceso (input), generalmente un interfaz instrumento/muestra, en otro suceso (output), típicamente, una lectura de salida de información. La fiabilidad de la señal se convierte en un foco primario de atención en el contexto del diseño instrumental. La señal se define aproximadamente como una variable transportadora de información. Los instrumentos científicos en interfaz con ordenadores digitales, ya sea para la adquisición de datos y/o control automático, incorporan mecanismos para la conversión de señales (Rothbart y Slayden, 1994).

Una vez que el diseño básico de un instrumento científico se establece, puede iniciarse un trabajo serio y detallado en los diferentes componentes del mismo. En

18. Las características especiales de las pautas de innovación de la instrumentación científica derivan precisamente del papel de intermediario epistémico antes mencionado.

muchas ocasiones esto implica intentos de mejorar el instrumento mediante modificaciones *ad hoc* de prueba y error. En otras ocasiones se toman y se adaptan soluciones de otros instrumentos. En otras, mejoras en un campo resuelven problemas de otro. Otras veces, por el contrario, son las mejoras en un área las que suscitan problemas en otras (Baird y Faust, 1990)¹⁹. Para comprender este tipo de progreso es necesario realizar un análisis detallado de la mejora en instrumentación. Como ha mostrado la literatura de la historia de la instrumentación científica²⁰, la necesidad de una mejor instrumentación ha tenido consecuencias que van más allá de aquellas que contemplan los instrumentos simplemente como una clase de mecanismos que son útiles para la observación y la medida (Rosenberg, 1992).

Böhme *et al.* (1978) proporcionan una relación histórica del papel de la instrumentación científica. Dicha relación establece una distinción entre lo que caracterizan como el periodo de 'orientación de la ciencia hacia la tecnología', que va desde el siglo XVII al siglo XIX, y el periodo que le sigue, de 'orientación de la tecnología hacia la ciencia'. Durante el primer periodo, las teorías de las ciencias naturales fueron teorías instrumentales, en parte porque éstas emanaban directamente de los análisis de los aparatos científicos²¹. Los instrumentos fueron diseñados para propósitos científicos como tales o, cuando ya existían en conexión con necesidades técnico-prácticas, se desarrollaban para objetivos científicos. En el periodo siguiente, ante las necesidades de la producción del siglo XIX, algunos procesos productivos disponibles fueron el resultado de desarrollos internos de la ciencia, que podían ser modificados atendiendo a objetivos industriales. En otras palabras, la oferta científica para la producción consistió principalmente en procedimientos sintéticos e instrumentos que en un principio habían sido creados con objetivos científicos; en muchos aspectos, la conexión entre ciencia y progreso tecnológico es un descendiente del 'modelo de oferta' del siglo XIX. Las nuevas tecnologías emergen como 'desprendimientos' de la investigación básica, en donde los instrumentos científicos desempeñan un papel decisivo.

Para Ackerman (1985) la ciencia moderna no se puede concebir sin los instrumentos científicos altamente especializados que los científicos utilizan para investigar la naturaleza y sus fenómenos. Algunos filósofos de la ciencia (Baird y Faust, 1990; Rothbart y Slayden, 1994) han insistido, asimismo, en la necesidad de adoptar una concepción del progreso del conocimiento científico lo suficientemente amplia que permita incluir en ella la producción de nuevos instrumentos científicos (y no

19. Las investigaciones llevadas a cabo por von Hippel (1976), Spital (1979), Irvine (1991) y Riggs y von Hippel (1994) sobre las pautas de los procesos de innovación de los instrumentos científicos se apoyan en este supuesto. En la sección 4 se analizan dos pautas de innovación de instrumentación científica diferentes desarrolladas por el IAC.

20. Véase Greenaway (1978).

21. Como se dijo anteriormente, para la ciencia la experiencia de la naturaleza está mediada por los instrumentos, los cuales son perfeccionados de conformidad con estándares científicos.

sólo concebir aquél como una clase de creencias verdaderas justificadas). Estos autores están interesados en analizar cómo un estado del conocimiento científico, que abarca tanto la teoría como la instrumentación, ayuda a generar nuevo conocimiento científico; en particular, nueva instrumentación. Para los autores citados, los avances en instrumentación científica están claramente implícitos en la definición de progreso: el progreso de la ciencia se identifica de esta manera con el progreso de los instrumentos y las técnicas; la sucesión de instrumentos científicos define una dirección de progreso (Ackerman, 1985). Existen numerosos ejemplos de progreso en la investigación científica que han sido fruto del deseo de diseñar el instrumento exacto que se necesitaba para resolver el problema que se tenía a mano (Bair, 1962). Para Baird y Faust (1990) el instrumento científico acabado es una unidad útil de progreso científico. Definición que es el resultado de la desaparición gradual de la distinción entre ciencia y tecnología antes mencionada.

En el siglo XX tanto el desarrollo de las ciencias hacia teorías especiales de la tecnología como el desarrollo de tecnologías hacia teorías especiales de las estructuras naturales muestran, según los mencionados autores, que la unificación de la ciencia y la tecnología ya no es simplemente un proyecto filosófico. Tanto dicha comprensión como el estudio del doble papel del *instrumentarium* merecen una atención más cercana no sólo por parte del filósofo, el historiador y el sociólogo de las ciencias sino también por parte del economista.

Teniendo en cuenta las observaciones anteriores, vale la pena hacernos eco de la pregunta que sugiere Rosenberg. En la medida en que las tecnologías de instrumentación científica parecen diferir enormemente en el abanico de su impacto científico, ¿cuál ha sido la forma en que las posibilidades de instrumentación han distribuido, de una manera selectiva, oportunidades que han afectado extensivamente tanto a la proporción como a la dirección del progreso técnico y científico? Responder esta pregunta nos lleva al tema del papel especial que los instrumentos científicos juegan en el interfaz ciencia/tecnología, y en concreto al tema del proceso de innovación en el sector de instrumentación científica.

Los estudios de Utterback (1971), von Hippel (1976), Spital (1979), Irvine (1991) y Riggs y von Hippel (1994) nos ofrecen una imagen de la secuencia del proceso de innovación del sector de los instrumentos científicos. En concreto, von Hippel (1976) distingue en dicho proceso de innovación una secuencia compuesta por siete etapas: 1) la percepción e identificación de la necesidad de una innovación; 2) la invención de una solución; 3) la puesta en práctica de esta solución por medio de la construcción de un prototipo; 4) el uso del mismo en el campo del usuario; 5) la difusión de la información sobre el diseño y los resultados que se pueden obtener con el nuevo instrumento²²; 6) la ejecución de la ingeniería de

22. Esta etapa desempeña un papel importante en nuestra hipótesis sobre la existencia de una alta posibilidad de que se produzca una apropiación privada del conocimiento público incorporado en la tecnología de la instrumentación científica.

producción con el fin de mejorar su seguridad así como hacerlo más 'amigable' para todo tipo de usuarios; 7) la producción y venta del producto. Von Hippel define el *locus* de innovación como 'dominado por el usuario' cuando éste lleva a cabo las cinco primeras etapas. En este caso las empresas intervienen principalmente en las dos últimas etapas. Existe evidencia empírica suficientemente significativa que muestra que en el sector de instrumentación los usuarios (mayoritariamente investigadores) desempeñan un papel más dominante que los 'productores' (empresas de instrumentación científica) en comparación con otros sectores tecnológicos.

Los estudios sobre instrumentación mencionados proporcionan un contexto para realizar algunas sugerencias recientes que subrayan la necesidad de un análisis más profundo sobre el papel de la instrumentación científica. Por razones que pronto veremos, vale la pena citar con cierta extensión las reflexiones de dos reconocidos especialistas que comparten dicha opinión. Por un lado, Rosenberg (1992) «sugiere que la aparición y difusión de las nuevas tecnologías de la instrumentación científica (al igual que las nuevas metodologías de la investigación) son consecuencias centrales pero olvidadas de la investigación básica universitaria. Como resultado de ello, el posible impacto económico de la investigación básica que tiene lugar en una disciplina académica particular se ha manifestado frecuentemente por medio de nuevas tecnologías de instrumentación y los subsiguientes ciclos de vida de estas nuevas tecnologías».

Rosenberg cree igualmente que el papel de los instrumentos tiene amplias consecuencias para la formulación de las políticas científica y tecnológica, como así lo subraya en el capítulo 'Cuestiones Críticas en Política Científica' en su obra de 1994 :

«Existe otra interacción ciencia/tecnología extremadamente importante que prácticamente no recibe atención. Dicha interacción supone difusiones de las nuevas tecnologías de la instrumentación, no desde una disciplina científica a otra, sino desde el status de herramienta de la investigación básica, a menudo en las universidades, al status de herramienta de producción, o bien de capital, en la industria privada. Se trata de un 'output' de la investigación básica que ha tenido gran trascendencia en sectores concretos de la economía. De hecho, instrumentación científica generada en el mundo de la investigación académica a partir de la Segunda Guerra Mundial ha sido responsable de contribuciones críticas a determinadas tecnologías industriales. En la industria electrónica, se incluirían instrumentos que son esenciales para la fabricación de los semiconductores, tales como la tecnología de la implantación de iones y el microscopio electrónico escáner. No está nada claro el por qué esta particular contribución económica de la investigación científica, incluyendo la investigación de naturaleza más fundamental, ha sido tan gravemente omitida» (Rosenberg, 1994).

De Solla Price (1984) va más allá en su valoración del papel de la instrumentación científica al elevar a ésta a una condición de *deus-ex-machina*, capaz de explicar los vacíos dejados por Kuhn en su explicación de los saltos vigorosos que caracterizan a las revoluciones científicas:

«La esperanza del experimentador...es que de vez en cuando, ya sea por suerte o por una elección inteligente, él o ella produzca resultados diferentes a los ya comprensibles dentro del paradigma preexistente. En pocas palabras, el investigador espera que se repita (si bien no siempre lo consigue) el síndrome de Galileo cuando un instrumento nuevo dio lugar a un tesoro de resultados no sólo inesperados sino que además significaban una trayectoria de cambio por su propia trascendencia. Cuando esto ocurre, la técnica nueva se convierte en ganadora. Todo se dirige a hacerla más poderosa, más general y de más amplia aplicación. Sin embargo, es interesante observar que aunque la descripción que acabamos de hacer se ajusta a un patrón [que debe ser] considerado normal y consistente [lo usual] es hablar en términos de golpe de suerte, accidente afortunado y casualidad. La historia de la tecnología es notablemente complicada y la vertiente instrumental de la ciencia experimental es quizás su rama más enrevesada. De ahí la dificultad de realizar una evaluación tecnológica sencilla».

El peligro de opiniones como las de Rosenberg y de Solla Price es que pueden llevar a generalizaciones excesivas. En efecto, aunque es cierto que los instrumentos constituyen un área olvidada de la investigación económica sobre tecnología, una rápida ojeada a casi cualquier historia de la tecnología o, incluso, a la Enciclopedia Británica revela la existencia de voces específicas y separadas dedicadas a los instrumentos. Sin embargo, antes de centrarnos en algunos de los resultados del trabajo de campo, conviene distinguir algunas de las características del área científica en la que nuestro estudio de caso está inserto.

Características de la investigación y de la instrumentación en astrofísica

La investigación astrofísica desarrollada en grandes instalaciones científicas se caracteriza por un conjunto de rasgos que conviene destacar a efectos de nuestra argumentación posterior:

1) *El desarrollo de la instrumentación es una parte integral, no secundaria, de la agenda de investigación en astrofísica.* La construcción y el desarrollo de instrumentación goza de una larga tradición en astronomía. En efecto, los instrumentos son parte casi intrínseca de la formación y de las actitudes de los astrónomos. Para dar un ejemplo: «Uno de los acontecimientos más importantes de la

revolución científica es el suceso histórico más decisivo para dilucidar la relación ciencia/tecnología: las primeras observaciones telescópicas realizadas por Galileo» (de Solla Price, 1984). O, por referirnos al presente, el plan de estudios de la licenciatura en astrofísica a principios de los 60 «era diseñado de tal forma que los primeros doctores en astronomía espacial podían llevar a cabo la totalidad de un programa de investigación, desde el diseño de la instrumentación a su construcción y análisis de los datos obtenidos» (Barry, 1991). De hecho, todos los Centros importantes de astronomía tienen un departamento de instrumentación cuyas funciones principales son el desarrollo, producción y mantenimiento de la instrumentación y procedimientos técnicos. En consecuencia, el informe sobre el futuro de la investigación en el IAC (IAC, 1983), elaborado por un panel de expertos externos, contiene una sección sobre desarrollo de instrumentación.

2) *Los físicos están particularmente bien dotados para llevar a cabo el trabajo interdisciplinario que se necesita en I+D en general, y en el desarrollo de la instrumentación en particular.* Esta característica está relacionada con el hecho de que «la física moderna es probablemente la principal 'exportadora' de conceptos y métodos a otras ciencias aunque, por supuesto, no es la única» (Rosenberg, 1994). A este respecto Rosenberg (1992) también ha señalado que «una buena parte de la aportación de la física a otras disciplinas se ha realizado a través de la 'emigración' tanto del trabajo como del capital, y que los doctores en física se han trasladado a otras disciplinas en mayor medida que los doctores de otras disciplinas». El hecho de que los físicos hayan mostrado una mayor capacidad de movilidad es por lo menos un indicador parcial de su capacidad para trabajar en otros campos.

3) *Muchos de los trabajos de desarrollo del IAC son o están relacionados con la microelectrónica (el 'core' de lo que Pérez (1988) denomina el nuevo paradigma techno-económico).* Los instrumentos pueden ser definidos por varios factores: la detección de una señal, su conversión en información transmisible, la conversión de dicha información para mostrarla en algún tipo de soporte, y el uso de medios eléctricos o electrónicos en cada una de las fases anteriores. Como veremos seguidamente, nuestro estudio de casos es una buena ilustración del hecho de que una parte importante de la capacidad investigadora en los últimos 20 años se ha dedicado al acople de los nuevos instrumentos científicos al ordenador. Esto incluye el control por ordenador de un amplio conjunto de experimentos que de otra forma no se hubiesen podido llevar a cabo.

4) *1, 2 y 3, unido a las amplias facilidades infraestructurales de las que normalmente disponen los Centros de Astronomía más una larga tradición de trabajo en equipo, proporcionan lo que nosotros consideramos como un medio o contexto especialmente favorable para llevar a cabo trabajo interdisciplinario.* En pocas palabras, como Metcalfe destaca: «la colaboración facilita una mejor gestión del proceso de innovación. Las fuentes de esta mayor eficiencia, por encima y además de la eliminación de la duplicación de I+D, están bien identificadas en la literatura, e incluyen:

– la construcción de instalaciones especializadas y de gran tamaño de I+D para explotar las economías de escala y alcance, y atraer personal de I+D de máxima calidad;

– la elaboración de un programa de I+D amplio para investigar todas las opciones existentes por medio de proyectos paralelos que exploren un campo tecnológico más amplio con el fin de reducir más rápidamente la incertidumbre;

– acercar empresas con bases de conocimiento complementarias de tal forma que la correspondiente confrontación de ideas estimule la creatividad de los equipos de investigación» (Metcalfe, 1995).

Aunque las características anteriores hacen referencia a la colaboración entre empresas, el sentido general de las mismas creemos que es igualmente aplicable al IAC así como, probablemente, a otros centros de investigación en gran ciencia. En particular, la existencia de una complementariedad de conocimientos que junto al conocimiento tácito facilita la fusión de información procedente de diferentes fuentes. Asimismo, pensamos- y proporcionaremos posteriormente evidencia al respecto- que la observación de que en ocasiones el conocimiento puede ser específico a la empresa es igualmente aplicable al IAC. Es decir, «la experiencia y el oficio acumulados por individuos y organizaciones, y las capacidades y la ‘memoria’ que se traspasan de un sector económico a otro, crean unas condiciones de contexto de características bien precisas. Se trata de especificidades que: a) son propias del país, de la región o incluso de la empresa; b) constituyen un elemento básico para los procesos de innovación [...]» (Cimoli y Dosi, 1992).

5) El IAC es un ejemplo de la cooperación internacional recomendada por la OCDE (1987) para superar las dificultades para su financiación y plena utilización que presentan las grandes instalaciones científicas, intensivas en capital y cada vez más necesarias en muchos campos de la ciencia básica -por ejemplo, en la física de partículas y en la astronomía. Más aún, la cooperación en la construcción y en el funcionamiento de estas instalaciones no sólo permite compartir la carga financiera de la investigación básica sino que también eleva el retorno potencial de los esfuerzos investigadores, promoviendo la difusión de la información científica y el establecimiento de equipos de investigación internacionales.

El estudio de dos desarrollos de instrumentación científica realizados en el IAC²³

Esta sección tiene dos objetivos:

23. La información que se usa en este apartado procede de entrevistas con el Dr. Sánchez, Director del IAC, con el Dr. Rebolo, investigador principal de un proyecto de cooperación internacional en relación con el primer instrumento, y con el Dr. Collados, actual responsable en

1) Proporcionar una imagen de los desarrollos tecnológicos producidos en la construcción de dos instrumentos científicos: un espectrógrafo de alto poder de resolución y un correlador solar. Estos instrumentos son el resultado del trabajo realizado por dos equipos de investigación del IAC. El primer caso es el subproducto de una solicitud para disponer de parte del 5% de tiempo de observación destinado a proyectos de cooperación internacional en los observatorios de Canarias, y el segundo, es el resultado de un proyecto del IAC²⁴.

2) Presentar el proceso interno de I+D en instrumentación y la situación de los instrumentos desde un punto de vista técnico y comercial.

De forma más precisa, el objetivo de las descripciones siguientes es destilar los elementos necesarios para una comprensión muy preliminar de las posibles trayectorias del interfaz Ciencia-Tecnología en Astrofísica -la cuestión central que nos preocupa. Este interfaz cabe concebirlo tanto bajo la dimensión de innovaciones incrementales (el espectrógrafo de alta resolución) como bajo la dimensión de innovaciones de carácter más radical (el correlador solar).

*El espectrógrafo de alta resolución*²⁵

El objetivo científico en el que se insertó la construcción de este instrumento fue verificar aspectos de la teoría del Big Bang (núcleo síntesis del big bang) midiendo la abundancia de berilio y litio²⁶ en estrellas deficientes en metales. Estas medidas imponen límites de observación más precisos requiriéndose observaciones con una resolución espectral muy alta. Con estos objetivos en mente, un

el IAC de la fase de desarrollo del segundo instrumento. El Dr. Rebolo fue el investigador principal del IAC del proyecto Light Elements Abundances, presentado al Comité Científico Internacional. Si bien el Dr. Collados no perteneció al equipo inicial del proyecto del correlador solar, su posterior responsabilidad en el desarrollo del prototipo así como de la instalación permanente del mismo como instrumento del telescopio solar alemán VTT, ubicado en el Observatorio de El Teide, hacen de él un informador privilegiado para nuestros propósitos. Los científicos citados nos proporcionaron la literatura científica que describe los instrumentos. Dicha literatura y sus pedagógicas explicaciones han sido de gran valor para proporcionarnos una «imagen» de su trabajo.

24. Como se señala en 1.4, el 5% de tiempo de observación figura en el Acuerdo de Cooperación Internacional en Astrofísica con el objetivo de promocionar la cooperación internacional en el uso de los observatorios canarios. España, como país anfitrión de dichos observatorios, dispone a su vez del 20% del tiempo de observación. El proyecto del espectrógrafo utilizó para sus pruebas el primer porcentaje, y el del correlador solar el segundo.

25. El resumen que sigue reproduce partes de McKeith et al.(1993) y también se basa en la entrevista con el Dr. Rebolo y el Dr. García.

26. La medida de la abundancia del berilio en estrellas pobres en metales permite a los astrofísicos explorar la evolución de este elemento. El litio es un trazador útil que proporciona información acerca de los procesos que pueden darse en el interior de las estrellas. Debido a que todavía existe incertidumbre respecto a la cantidad de estos elementos generados en el Big Bang, su cuantificación constituye un punto de sumo interés en la agenda de investigación astrofísica.

equipo de investigación internacional formado por personal del IAC y de la Queen's University de Belfast diseñó y construyó un nuevo espectrógrafo con el fin de ser utilizado durante el tiempo de observación concedido por el Comité Científico Internacional (CCI) de los observatorios del IAC en el periodo 1990/91, en el Telescopio Óptico Nórdico (NOT) de 2,5 m., situado en el Roque de los Muchachos. La ventaja específica del nuevo espectrógrafo radicaba en su mayor poder de resolución. *Queen's University* de Belfast se encargó de la óptica y el IAC del detector, del sistema de adquisición, del sistema de acoplamiento entre la óptica y el detector, del sistema de almacenamiento, procesamiento e inspección de datos más las pruebas del instrumento ensamblado.

El concepto de diseño fue el de un espectrógrafo con una óptica comparativamente simple, con un alto grado de libertad respecto a distorsiones estructurales y de temperatura, y que funcionaba en toda la longitud de onda observable con cámaras CCD²⁷ situadas en telescopios terrestres. La necesidad de alcanzar una cierta longitud de onda, y la disponibilidad comercial de filtros aislantes de banda estrecha para la citada longitud de onda determinó la difícil elección de la densidad de la red de *echelle*²⁸.

El sistema de detección usado fue un producto de la empresa Wright Instrument con un *chip* Thompson de 1024x1024 pixels²⁹ (CCD). Originalmente la cámara CCD era controlada por un ordenador personal con un software comercial que se facilita conjuntamente con el CCD. Aunque este sistema permite a los usuarios fijar interactivamente los diferentes parámetros relacionados con las observaciones (tiempo de exposición, ganancia, ventana, intervalo de muestra), los procedimientos para el examen de las imágenes obtenidas eran insuficientes para los objetivos de la investigación. Por esta razón, el equipo de trabajo del IAC decidió acoplar el ordenador personal a una estación de trabajo SUN e introducir el sistema que permite usar el software IRAF³⁰ en dicha estación de trabajo SUN. Dicho acople tiene la ventaja de permitir usar todo el poder de los paquetes de reducción de datos del IRAF para examinar las imágenes obtenidas, así como tomar decisiones sobre las observaciones en tiempo real. Asimismo, la conexión citada proporciona un entorno homogéneo para la observación y la reducción de datos así como una forma 'amigable' de establecer los parámetros relacionados con las observaciones.

En el momento en que se instaló (verano 1991) su poder de resolución mejoró entre un factor 3 y 4 si se compara con los espectrógrafos instalados en los Obser-

27. Las cámaras CCD son detectores bidimensionales de imágenes de gran eficiencia -usadas, por citar un ejemplo, en las cámaras de vídeo.

28. Red de difracción que proporciona alta resolución espectral.

29. El pixel es el elemento de resolución del detector, equivalente al "grano" de la placa fotográfica.

30. El paquete de reducción de datos IRAF es distribuido por National Optical Astronomy Observatories, dirigido por la Association of Universities for Research in Astronomy Inc. bajo contrato con la National Science Foundation norteamericana.

vatorios internacionales canarios³¹. Internacionalmente, en aquel momento existían, sin embargo, instrumentos con mayor poder de resolución en observatorios como los de La Silla (Chile), Hawai y McDonald (Estados Unidos). El IACUB, no obstante, permitió, por un lado, suplir una carencia en los observatorios canarios, colocándolos en el estándar internacional³² y, por otro, cubrir un “nicho” de investigación que requería un poder de resolución específico.

La estimación del coste para la totalidad del instrumento (el espectrógrafo, la cámara de adquisición y guía, la cámara CCD, filtros y lámparas, y el equipo de computación) fue de alrededor de 13 millones de pesetas. Esto no incluía los costes de personal. Un referente puede ser el espectrógrafo diseñado por la Universidad de Utrecht e instalado en el telescopio W. Herschel en el ORM. El coste de este instrumento fue de alrededor de 100 millones de pesetas, contando con más componentes que el IACUB, con mayor versatilidad pero con menor poder de resolución.

Los primeros resultados obtenidos con el instrumento tanto en las pruebas de laboratorio como durante el tiempo de observación concedido por el CCI mostraron la precisión del espectro registrado. El uso subsiguiente del instrumento en el NOT ha proporcionado espectros a diferentes longitudes de onda procedentes de diferentes objetos; resultados que están siendo utilizados por investigadores del IAC, del QUB y otros institutos.

El prototipo inicial ha sido mejorado como resultado de las sugerencias hechas por algunos usuarios: reforma de la unidad guía y de adquisición; mejora en el uso de las lámparas de calibración espectral y *flatfield*³³; modificación del soporte del filtro para introducir un engranaje que facilite el cambio de filtros durante las observaciones. Con estas mejoras y la adquisición de una nueva CCD, el nuevo espectrógrafo funciona en el ORM como un espectrógrafo de alta resolución muy eficiente, fácil de operar y de bajo mantenimiento. En 1996, el IACUB sigue siendo competitivo. Un dato significativo puede ser el siguiente: el 30% del tiempo CAT en el NOT sigue utilizando el IACUB.

En resumen, el IACUB ha significado una mejora con características propias importantes. Es un diseño para observaciones específicas (por ejemplo, para observar el berilio; estudiar líneas espectrales; establecer medidas precisas de velocidad radial, etc.). El objetivo científico ha implicado diseñar un instrumento con óptica de reflexión (sin necesidad de lentes) que puede realizar observaciones de alto poder de resolución como 3.100 angstroms, lo que implica observaciones del ultravioleta cercano. El diseño, construcción y utilización del instrumento y la

31. Una referencia era el IDS (Intermediate Dispersion Spectrograph) instalado en el telescopio Isaac Newton (2.5m).

32. Los estándares internacionales en aquel momento los constituían los espectrógrafos Coudé echelle de los Observatorios de La Silla y de McDonald.

33. Calibración de la sensibilidad del detector pixel a pixel.

coordinación de tres instituciones (*Queen's University*, IAC y NOT) se ha producido en un tiempo récord. La idea surge en 1990 y el instrumento está operando en Agosto de 1991.

Por primera vez en el IAC, se ha llevado a cabo el montaje total del espectrógrafo, así como el alineado de la óptica y la calibración del sistema de movimiento de la red de difracción. Esto, junto con la realización de planos detallados de toda la estructura, ha supuesto el que el IAC disponga de un conocimiento y control completos acerca del instrumento. Se trata pues de un interfaz que ha tenido éxito generando inmediatamente datos útiles para publicar. El IACUB constituye, por tanto, un buen ejemplo de los cambios menores que según Rosenberg han recibido escasa atención teórica debido a la "frecuente preocupación con lo que es tecnológicamente espectacular más que con lo que es económicamente significativo" (Rosenberg, 1982).

El correlador solar del IAC³⁴

La comprensión de los procesos físicos que tienen lugar en la atmósfera solar requiere observaciones con capacidad de resolución de escalas espaciales muy pequeñas. De ahí los esfuerzos que se dedican al diseño y construcción de una nueva generación de telescopios solares y otros instrumentos complementarios. Las imágenes solares, tales como la granulación solar, se caracterizan por estructuras de bajo contraste que exhiben formas extendidas, irregulares y variables en el tiempo. El uso de esta clase de imágenes, distorsionadas por la atmósfera y por las propias vibraciones mecánicas de los telescopios, requiere la ayuda de técnicas de correlación robustas para detectar sus desplazamientos. El movimiento de imagen puede ser esencialmente eliminado en una porción de la imagen solar mediante los correladores solares (CS) que se convierten en los instrumentos desarrollados para satisfacer estas demandas científicas. Estos instrumentos son sistemas de seguimiento que se basan en el estudio en tiempo real, mediante técnicas de correlación, de los desplazamientos de sucesivas imágenes vivas respecto a una de referencia. Los desplazamientos se convierten en una señal de error que es transmitida a un espejo activo que compensa el movimiento. La imagen de referencia debe ser actualizada con frecuencia para tener en cuenta la evolución morfológica de la imagen objeto de observación. Las especificaciones de un CS están, pues, determinadas por: a) los tipos de imágenes que se quieren estabilizar, b) la frecuencia de respuesta que se necesita, y c) el rango de control. Una medida

34. El resumen que se presenta en este epígrafe reproduce parte de Ballesteros et. al (1994a, 1994b), Collados (1995), Memorias IAC (1991, 1992, 1993 y 1995) y también está basado en entrevistas con el Dr. Collados.

de eficiencia de los CS es, pues, el rango de frecuencia que corrige, una variable temporal.

Hasta ahora muy pocos sistemas de este tipo se han desarrollado con éxito. Los pioneros en la construcción de esta clase de instrumentos han sido von der Luhe *et al.* (1989) y Rimmele *et al.* (1991). Las dificultades en los CS existentes para obtener una frecuencia de respuesta suficientemente alta surgen principalmente del largo intervalo de tiempo que media entre la toma de una imagen viva para estudiar su desplazamiento y la producción de una señal de error que se envía al espejo compensador. Durante ese intervalo de tiempo, se realiza la lectura del detector y una serie de cálculos entre los que figura el de la correlación de imágenes vivas con la de referencia. El retraso se convierte, por tanto, en una variable que afecta al rendimiento del instrumento. Cuanto más corto sea el retraso mejor, o en otras palabras, cuanto más rápida sea la rectificación mejor será el output (imágenes solares más rápidas y mejores).

En 1992 el IAC inicia un proyecto de instrumentación con el fin de minimizar el mencionado retraso, y diseña y construye un CS como proyecto englobado dentro de las técnicas de alta resolución espacial. Dicho CS consta de una parte electrónica y de una parte opto-mecánica y utiliza como método de correlación el "algoritmo de las diferencias absolutas" calculado mediante un procesador específicamente diseñado para ello (LSI Logic L64720)³⁵. Dicho procesador especializado en el cálculo de la correlación con gran eficiencia (16x16 posiciones relativas en 150 microsegundos) permite la realización técnica del CS de forma más sencilla y económica.

Para el diseño, la construcción y prueba del CS del IAC, ha sido necesario llevar a cabo las siguientes tareas: evaluación del procesador LSI L64720; diseño conceptual del CS basado en el anterior procesador; diseño óptico; diseño mecánico; desarrollo del sistema de control digital; lectura y adecuación de los datos del detector; fabricación del hardware correspondiente al diseño basado en el uso del LSI L64720; fabricación del sistema de control que actúa sobre el espejo móvil; montaje del espejo sobre una célula de actuadores piezoeléctricos; ensamblado de toda la parte electrónica; ensamblado global del sistema electrónico con el optomecánico; pruebas de funcionamiento en laboratorio; y, pruebas de funcionamiento en el telescopio³⁶.

35. Este método determina el desplazamiento entre dos imágenes calculando para cada desplazamiento relativo la suma de los valores absolutos de las diferencias entre sus intensidades pixel (elemento de resolución del detector, equivalente al "grano" de la placa fotográfica) relativas. La posición en la que esta suma es minimizada se denomina match location. Otros correladores solares desarrollados anteriormente usan el algoritmo de la covarianza para detectar el desplazamiento de la imagen.

36. El instrumento fue probado con éxito por primera vez en el telescopio solar alemán VTT (Observatorio de El Teide, Tenerife) y en el telescopio solar sueco SVST (Observatorio de El Roque de los Muchachos, La Palma) durante dos períodos de observación en el verano de 1992, demostrando el rendimiento esperado y confirmando la robustez del algoritmo.

El 'valor añadido' del nuevo instrumento radica en que las características técnicas del nuevo sistema permiten superar las limitaciones provenientes de los grandes retrasos computacionales asociados a otras alternativas tecnológicas, consiguiendo de esta forma una frecuencia de respuesta considerablemente más alta. El cuadro siguiente pone de manifiesto dicha mayor eficiencia al comparar algunos resultados numéricos del CS del IAC con otros.

Tarea	IAC CS	Otros CS
Cálculo de correlación	90 μ segundos	~ 1 milisegundo
Retraso entre toma de imagen y producción de la señal de error	386 μ segundos	~ 2-3 milisegundos
Anchura de borde del servo	45 Hz	~ 20 Hz

El detector del nuevo CS mostró ser más 'amigable' y tener un mejor comportamiento dinámico —se comporta mejor que otros por lo que se refiere a la distorsión de imágenes (como la borrosidad-falta de nitidez- causada por la atmósfera) y al 'ruido' aditivo y multiplicador del propio instrumento—. El uso de este algoritmo y el instrumento que lo incorpora (el chip LSI Logic L64720) son considerados por el Dr. Collados como el 'núcleo', en términos de hardware, de la innovación. Sin embargo, la mera disponibilidad de este hardware no es suficiente para su reproducibilidad ya que si bien en las publicaciones científicas en las que se ha comunicado la misma (Ballesteros *et al.*, 1994a ; Ballesteros *et al.*, 1994b) se describía su desarrollo, la innovación estaba protegida al contener elementos específicos de la institución que la ha desarrollado (conocimiento tácito) y porque la información estaba insuficientemente codificada. Como nos informaba el Dr. Collados, "el grupo sueco del Observatorio del Roque de los Muchachos, ... lo están intentando hacer ellos mismos, aunque por ahora no han tenido éxito".

Durante 1993 se consiguieron todos los objetivos que se había planteado el proyecto. El CS demostró, mediante su puesta a prueba en diferentes periodos de observación con diferentes propósitos científicos, su capacidad y utilidad para ayudar a obtener datos de alta calidad en el telescopio solar de torre al vacío (VTT), del OT.

Como consecuencia de los buenos resultados conseguidos varias instituciones extranjeras como el *National Solar Observatory* norteamericano, el grupo sueco en el ORM, la Fundación para la construcción del telescopio solar LEST y el alemán *Kiepenheuer Institut* (KIS) de Friburgo, propietario del telescopio VTT, mostraron interés para que el IAC construyera otros CS para sus instalaciones. Hasta ahora ha prosperado un acuerdo entre el Instituto alemán y el IAC que se ha traducido en la construcción de un CS de uso común en el VTT del OT (el ACST, *Advanced Solar Correlation Tracker*). El KIS ha rediseñado y construido la parte óptica y mecánica mientras que el IAC se ha encargado de la electrónica y soft-

ware de comunicación con el usuario. Durante 1995 se finalizó la instalación y pruebas del ACST en el VTT con éxito. Resultado de esta fructífera colaboración se han mejorado las características técnicas del prototipo inicial del IAC.

¿Qué información podemos destilar de las descripciones anteriores?

Como los textos de los dos casos estudiados indican, la trayectoria tecnológica seguida está clara y fundamentalmente guiada por criterios y necesidades científicas, actuando la tecnología (concebida principalmente en términos de artefactos) como una limitación que debe ser continuamente 'superada'. El espectro de soluciones tecnológicas dadas a las necesidades científicas giran, sin embargo, alrededor de la lógica impuesta por el paradigma tecnológico dominante: la microelectrónica. Los desarrollos dentro de este paradigma, movidos por factores exógenos a la astrofísica -la cámara CCD y el *chip* LSI Logic L64720- son escogidos e 'introducidos' en el IAC para resolver necesidades científicas. Aunque estas necesidades eran diferentes en los dos casos estudiados, en ambos casos se derivan y están conformadas por las necesidades de detección de señales en astrofísica y la conversión de las mismas en información que sea científicamente útil. Para conseguir esto, se usan medios electrónicos y ópticos en las distintas fases con el objetivo general de reducir los tiempos de espera o retraso, trabajar en tiempo real así como mejorar la capacidad de detección de imágenes y la calidad de éstas.

El proceso puede ser visualizado como una trayectoria en la que el progreso en tecnología proporciona un conjunto cada vez más amplio de artefactos que son seleccionados según su capacidad de 'encaje' en el equipamiento y necesidades astronómicas. A pesar de ello, en la medida en que es frecuente que tanto los objetivos como la heurística de la 'búsqueda' tecnológica difieran de los que guían a la investigación científica, las cuestiones que exigen un mayor análisis son los efectos de esta divergencia sobre:

- a) El interfaz ciencia-tecnología característico de la astrofísica.
- b) Las aplicaciones actuales en otras actividades de los instrumentos desarrollados en astrofísica³⁷.

Para continuar en el estudio de las dos cuestiones anteriores tenemos que completar nuestro conocimiento de la heurística que caracteriza el interfaz ciencia/tecnología en astrofísica en general, y el grado en que la base de conocimiento del IAC se caracteriza por una dimensión tácita y específica, en particular. Esto a su vez nos permitirá:

- 1) Identificar el conocimiento del IAC, software e instrumentación con potencial aplicación exterior.

37. Necesidades más directamente estimuladas por la teoría en el caso del IACUB que en el CS.

2) En qué medida, sin distorsionar la agenda de investigación científica del IAC, necesidades tecnológicas externas- es decir, con potencial de aplicación en otras actividades- pueden ser insertadas en las primeras etapas de desarrollo de nueva instrumentación.

Para finalizar esta sección transcribiremos algunos extractos de nuestras entrevistas con los Dres. Sánchez, Rebolo y Collados. Nuestro objetivo es usar estas transcripciones como señales indicadoras que adelantan algunas de las cuestiones más teóricas que trataremos en el resto de nuestro trabajo.

«El correlador solar del IAC ha tenido tanto éxito que un centro astrofísico norteamericano nos ha pedido que construyamos uno para ellos» (Dr. Sánchez, Director del IAC).

«Al prototipo inicial del espectrógrafo se le han añadido algunas mejoras siguiendo las sugerencias realizadas por otros usuarios» (Dr. Rebolo).

«¿Cuánto se le facturará a los norteamericanos por la construcción del correlador solar? Únicamente los costes de material pero no los costes de mano de obra. Pero, excluir los costes de mano de obra ¿no es un poco injusto? No, porque obtendremos algo a cambio que no tenemos: software, know-how, etc.» (Dr. Collados).

«¿Ha mostrado algún otro grupo, además del norteamericano, interés por el correlador solar del IAC? Sí, el grupo sueco del observatorio del Roque de los Muchachos, pero como no tenían los fondos necesarios lo están intentando hacer ellos mismos, aunque por ahora no han tenido éxito». (Dr. Collados)

«¿Ha pensado en posibles aplicaciones comerciales para el espectrógrafo? No, eso necesitaría un tiempo del que simplemente no dispongo; aunque si se considera la cuestión con tranquilidad es bastante probable que se pudieran hacer algunas sugerencias al respecto». (Dr. Rebolo).

«¿Está patentado el correlador solar desarrollado por el IAC? De hecho el tema se trató, pero como los resultados preliminares de nuestro desarrollo se publicaron en una revista científica, no se pudo patentar». (Dr. Collados).

Transferibilidad o comercialización

La aparente falta de preocupación por lo que podríamos llamar la cuestión de la transferibilidad, que podría desprenderse de las citas anteriores, no debe ser mal interpretada. Por un lado, puede ser un simple reflejo de trabajar en un centro donde el tiempo de trabajo en el telescopio actúa como un *de facto numeraire*. Y, por otro, como muchos libros de divulgación sobre astronomía podrían confirmar,

el énfasis en la pureza de las actividades de los astrofísicos forma parte del ethos de la profesión -una búsqueda de lo que aparece como 'causas últimas': «El interés de nuestra civilización en astronomía *no depende de consideraciones utilitarias. Es tan profundo y duradero* como el interés por nosotros mismos porque es el estudio de nuestro entorno y, en algún sentido, de nuestro origen [Boyd(1968), citado en Barry(1991)].

Resulta obvio que la opinión expresada por Boyd -una opinión que acepta la noción de que los esfuerzos de los astrónomos no ejercen efectos inmediatos sobre la capacidad productiva de la sociedad que paga sus salarios, e incluso parece regocijarse en dicha noción³⁸- es, tal vez por desgracia, difícil de mantener hoy día. En efecto, esta opinión, así como las actitudes expresadas en los fragmentos citados arriba sobre lo que podríamos denominar la cuestión de la transferibilidad-cum-licencia, contrasta con las crecientes presiones ejercidas sobre los centros de investigación básica y las universidades en general, para que se preocupen más por los aspectos de transferibilidad y propiedad de los resultados de la investigación básica. En otras palabras, se ha solicitado a la ciencia como organización social, y a la comunidad científica como organismo que la representa, que tomen más consciencia de la naturaleza de bien de capital privado que tiene el conocimiento que generan. Se fomenta que las instituciones como las universidades se preocupen más por la cuestión de la apropiabilidad de los resultados de la investigación. Por ejemplo, la nueva normativa de los EEUU ha ido en esa dirección³⁹. En esta nueva situación, las patentes son propiedad del investigador, con la universidad controlando el acceso a las mismas en la mayoría de los casos⁴⁰. Por lo tanto, una de las principales ventajas de la actividad de la comunidad científica, a saber, la comunicación horizontal entre científicos y técnicos -la actividad de compartir instalaciones, resultados, etc., una especie de comercio de trueque en la comunidad científica- se encuentra, en apariencia, en peligro de verse menguada. La restricción en el grado de apertura de la comunicación entre académicos

38. Cuando leemos en *Wrinkles in Time* (Smooth and Davidson, 1993), un relato de lo que Stephen Hawking consideró «el descubrimiento científico del siglo, si no de todos los tiempos», vemos hasta qué punto puede llegar un astrónomo para descartar un error en su investigación: «La única manera de abordar la cuestión galáctica era realizar mejores observaciones galácticas en la Antártida». Ver capítulo 13, 'An awful place to do Science' para un relato del viaje de Smooth a la Antártida.

39. Nelson (1989) señala que la antigua política de los EEUU con respecto a las patentes emanadas de investigaciones financiadas por el gobierno y realizadas en las universidades determinaba que los derechos de patentes correspondían al gobierno, lo cual conllevaba una política general de facilitar la concesión de licencias para dichas patentes.

40. Para Nelson, esto podría explicar el surgimiento de actitudes empresariales en las universidades. Para nosotros, la investigación sobre el impacto que ejerce la normativa en el fomento o limitación del establecimiento de joint ventures por parte de los científicos, creadas ex-profeso para cosechar futuros beneficios provenientes de la comercialización de sus nuevos descubrimientos, parece ser un campo de análisis prometedor. Las comparaciones internacionales podrían también merecer la pena como campo de investigación.

en los campos que tienen importancia comercial, se presenta como una consecuencia no deseada de este nuevo sistema regulador.

Dichas presiones, ciertamente, han desencadenado un proceso que está cambiando la ética y los intereses que han guiado la investigación básica hasta la década de 1970, como muy bien puede atestiguar cualquier académico. Y, si bien el proceso se ha caracterizado por intensas discusiones y disputas, la esencia de la discusión ha sido conformada por la tensión generada por la ética 'anterior' y la necesidad de financiación de recursos en tiempos de restricciones presupuestarias. Puede parecer sencillo identificar lo que funciona mal, pero en las circunstancias actuales, todo énfasis sería poco: «tratar de hacer que las universidades se parezcan más a laboratorios industriales tenderá a distraer su atención de sus funciones más importantes, que son constituir una importante fuente de nuevo conocimiento tecnológico de uso público, así como el vehículo más eficaz de que dispone la sociedad para hacer público el conocimiento tecnológico» (Nelson, 1989). Esta opinión es también compartida, y enérgicamente expresada, por Feller (1990): «Las universidades han acumulado capital intelectual y político no sólo por su pericia científica y técnica, sino por su papel simbólico y putativo como interlocutor, comprometido pero sin afán de lucro, del discurso social».

Sin embargo, la tensión no puede solventarse, como sugiere Nelson (1989), adoptando una postura ecléctica, en la que se resalta un rasgo peculiar de la tecnología: que constituye, en parte, un bien privado y, en parte, un bien público, y que es importante conservar ambos aspectos. Pero, ¿cómo se supone que va a diferenciar la sociedad entre lo que es público y lo que es privado si, como nos recuerda el propio Nelson, los límites que separan lo privado de lo público son difusos y cambiantes? Tratar de hacerlo implicaría, aparentemente, que la línea divisoria entre lo privado y lo público está situada en algunas características inherentes a ciertas tecnologías. Según Dasgupta⁴¹, «existe una distinción mucho más fuerte para los que elaboran políticas económicas, que se deriva de la existencia de dos amplias organizaciones sociales -que podemos denominar ciencia y tecnología- y que reciben su impulso de diferentes actitudes con respecto al resultado de la investigación. Hemos sostenido que la ciencia, como organización social, considera el conocimiento como un bien de consumo público, mientras que la tecnología lo considera como un bien de capital privado. Al ser distintas sus actitudes colectivas, sus normas y códigos de conducta son diferentes. Una característica importante de la 'ética científica' es que los científicos están obligados a revelar todos los nuevos hallazgos y someterlos a la inspección crítica de otros miembros de la comunidad. Al presentar sus descubrimientos a sus colegas, *qua* científicos

41. En la autorreferencia que hace en un ensayo escrito conjuntamente por él y Paul David (1987).

renuncian al derecho de control exclusivo sobre dicha información». Esto concuerda con los hallazgos de Riggs y von Hippel (1994) en su trabajo sobre los incentivos a la innovación y las fuentes de innovación en el caso de los instrumentos científicos: «Los usuarios científicos buscan su recompensa en la sensación de logro y en la consideración de sus colegas con respecto a dicho logro. Por el contrario, los fabricantes de instrumentación científica buscan su recompensa en forma de beneficio monetario».

Sin embargo, las actitudes, así como lo que es privado y lo que es público, son en gran medida conformadas y delimitadas por las instituciones -un aspecto que Nelson, sorprendentemente teniendo en cuenta su postura teórica, sólo menciona con referencias superficiales a la sociedad. El tema que tratamos plantea toda una gama de problemas, y lo que hemos dicho hasta aquí en esta sección es tan sólo una introducción provisional y tentativa sobre varios aspectos que han salido a la luz gracias a nuestro trabajo de campo. A continuación nos ocuparemos de dichos aspectos bajo dos secciones: «La información y la tecnología como bien público» y «Las patentes *versus* otras formas de apropiabilidad».

La información y la tecnología como bien público

Desde que Arrow (1962) caracterizó los procesos de la invención y la investigación como actividades económicas, destinadas a la producción de información (o conocimiento) en tanto que mercancía, se ha convertido en práctica habitual identificar dicha mercancía como poseedora de las tres razones clásicas para una posible falta de la competencia perfecta necesaria para alcanzar una asignación óptima de recursos: indivisibilidades, inapropiabilidad e incertidumbre. Como sugiere Metcalfe (1995) «el problema que surge de la cuestión de la apropiabilidad se desliza hacia el aspecto de la producción de conocimiento que más nos preocupa aquí: el conocimiento como bien público; en otras palabras, como una entidad cuyo uso por parte de un individuo no excluye su uso por cualesquiera otros individuos. Este es el aspecto de no rivalidad de un bien público. Dado que los individuos que utilizan los bienes públicos tienen fuertes incentivos para evitar el pago por su utilización, se deduce que los mecanismos convencionales de mercado pueden no permitir a los productores de conocimiento cubrir sus costes. Sin embargo, si la producción de conocimiento puede rodearse de condiciones que eviten que los individuos accedan a dicho conocimiento a menos que paguen la tasa correspondiente, se posibilita la existencia de un sistema de mercado que apoye la producción de conocimiento. Este es el aspecto de excluibilidad de un bien público. Los clubs constituyen uno de estos mecanismos; *materializar el bien público [el conocimiento] en un artefacto privado es otro mecanismo.*»

Caracterizar, sin embargo, el conocimiento como un bien público -y éste es el aspecto en el que queremos hacer hincapié- está bien en la medida en que no lo identifiquemos mecánicamente con el tipo de bienes públicos puros (como los faros de señalización marítima o la defensa nacional) que normalmente utilizamos como ejemplos en las explicaciones de clase. De hecho, una buena parte de las contribuciones más recientes a la tecnología -sobre todo las que pueden caracterizarse como pertenecientes a la escuela evolucionista- han hecho importantes distinciones entre diferentes categorías de conocimiento (Dosi, 1988). Esto ha llevado a una comprensión más profunda de la transferibilidad, las condiciones para la apropiabilidad, etc. Teniendo en cuenta estas distinciones, no resultaría sorprendente constatar que «las condiciones de apropiabilidad difieren de una industria a otra y de una tecnología a otra» (Dosi, 1988). Levin *et al.* (1987) estudiaron los distintos mecanismos que empleaban las empresas para establecer y proteger la vertiente de propiedad de los resultados de la actividad de I+D. Los mecanismos de apropiabilidad estudiados fueron: a) patentes, b) confidencialidad, c) liderazgo en la innovación, d) costes y tiempo necesarios para la duplicación, e) efectos de aprendizaje, y f) mayores esfuerzos en las iniciativas de ventas y servicios. Sus principales hallazgos fueron que el liderazgo en la innovación y las ventajas del aprendizaje, en combinación con las iniciativas de marketing complementarias, parecen constituir los principales mecanismos para la apropiación de los beneficios procedentes de innovaciones en los productos.

Dos de los hallazgos de Levin *et al.* son particularmente relevantes para nuestra investigación: a) con algunas excepciones, las patentes son consideradas como medios complementarios de protección, más que como el principal de ellos; y b) la industria de la instrumentación científica fue una de las pocas que informó que el sistema de patentes era su mecanismo más eficaz para proteger la innovación de productos. En concreto, se sugiere que la facilidad relativa para definir y delimitar la composición del producto es una condición importante para obtener patentes que puedan ser efectivas.

Sin embargo, en la medida en que un instrumento científico 'encarna' el conocimiento público, y en tanto que dicho conocimiento no haya sido utilizado antes, la obtención de una patente para un instrumento implica la conversión de lo que Nelson (1989) denomina un bien público latente en un bien privado. Esta cuestión la ha presentado de Solla Price (1984) de forma más general y contundente: «Hay otro aspecto que merece ser mencionado. Cuando surge una nueva instrumentalidad en un contexto académico, el descubridor puede decantarse hacia la divulgación abierta al estilo científico, convirtiéndola en un bien gratuito, o una patente al estilo tecnológico, convirtiéndola en un bien valioso. Esta elección sustenta gran parte de la tensión existente en las relaciones universidad-industria».

Las consideraciones anteriores plantean la cuestión de la apropiación privada en forma de patente *versus* otros mecanismos de apropiabilidad encontrados en

nuestro trabajo de campo -formas que, hasta donde nuestro conocimiento alcanza, sólo han recibido un tratamiento superficial en la bibliografía.

Patentes *versus* otras formas de apropiabilidad

Como se señaló anteriormente, los límites de lo privado y lo público son definidos, en gran medida, por las instituciones. En el caso de las innovaciones, la institución que define dichos límites es el sistema de patentes. Es por esta razón, y para poner en contexto nuestros hallazgos, que creemos necesario hacer algunos comentarios generales sobre el sistema de patentes antes de entrar en las cuestiones específicas que serán tratadas en esta sección.

Aunque la legislación sobre patentes ha adquirido una posición de privilegio como instrumento de protección, la opinión de numerosos economistas que han examinado los beneficios y costes del sistema de patentes no avala dicha posición. Así, "es casi imposible concebir ninguna institución social tan defectuosa en tantos aspectos. Sobrevive solamente porque parece que no hay nada mejor" (Jewkes, Sawers y Stillerman, citado en Portellano, 1995). Por otro lado, la conclusión, frecuentemente citada, a la que ha llegado uno de los especialistas más destacados en el estudio económico del sistema de patentes es, por denominarla de alguna forma, intelectualmente insatisfactoria: "si no tuviéramos un sistema de patentes sería una irresponsabilidad, de acuerdo con las bases de nuestro actual conocimiento de sus consecuencias económicas, recomendar instituir uno. Pero dado que tenemos uno desde hace tiempo, sería una irresponsabilidad, de acuerdo con las bases de nuestro actual conocimiento, recomendar su abolición" (Machlup, 1958). De ahí el comentario más reciente de Metcalfe (1995): «El derecho de patentes es uno de los instrumentos de política tecnológica que más tiempo lleva establecido y, sin embargo, sus efectos sobre el patrón de cambio tecnológico y bienestar económico permanecen inmersos en la controversia».

Una patente implica un poder de monopolio temporal sobre todas las formas de «explotación industrial de una invención, y no solamente con respecto a la versión o aplicación concreta del concepto sobre el cual el inventor ha trabajado realmente en el transcurso de la investigación. Sin embargo, precisamente por el considerable atractivo que poseen, la concesión de patentes debe reservarse para los casos más notables -avances que tengan la categoría de 'invenciones patentables'. Hoy día esto implica varios requisitos legales previos que, en los sistemas más desarrollados, incluirán una exigencia sustantiva de avance inventivo con respecto a la situación existente, así como el examen por una Oficina de Patentes, antes de la concesión. Estas condiciones convierten la obtención de la patente en un asunto lento, caro, complejo y, con frecuencia, incierto, sobre todo para las pequeñas empresas.» (Cornish, 1993).

Las condiciones de las patentes a las que acabamos de hacer referencia contrastan con el creciente énfasis de las instituciones en la obtención de patentes de la investigación académica. Más aún si tenemos en cuenta los siguientes hechos:

1) «Sólo unas pocas patentes, aquéllas que definen nuevas configuraciones de diseño, son de importancia considerable, mientras que el resto protegen innovaciones incrementales de tipo cotidiano» (Metcalfé, 1995).

2) Según Mansfield *et al.* (1981) «aunque las patentes aumentan los costes de imitación por parte de los rivales, no parecen retrasar de modo significativo el proceso de imitación continua; aproximadamente un 60% de los nuevos productos investigados fueron imitados antes de cuatro años. Más aún, los rivales tuvieron conocimiento de importantes decisiones de desarrollo entre doce y dieciocho meses después de la toma de dichas decisiones».

3) La gran mayoría de las patentes no se mantienen hasta el final de su plazo legal, que en los tres regímenes de patentes más importantes (Europa, Estados Unidos y Japón) se sitúa actualmente en los veinte años. Por ejemplo, un estudio de Taylor y Silberston (1973) muestra que sólo el cincuenta por ciento de las patentes concedidas permanecen en vigor después de nueve años, y que sólo el dieciocho por ciento se mantienen hasta el final. Mientras que Schankerman y Pakes (1986) en un trabajo más reciente indican que en el Reino Unido, Francia y Alemania, menos de la mitad de las patentes concedidas se mantienen después de ocho años, y sólo un cuarto sobreviven trece años. A pesar de la importancia del tema, la evidencia empírica sobre la duración de patentes (determinada ésta por el pago de las correspondientes anualidades de renovación) no es muy abundante. Por esta razón, uno de nosotros ha realizado un estudio sobre los plazos de mantenimiento de patentes europeas en Alemania, Francia y Suiza cuyos resultados difieren de los antes mencionados. En concreto, tanto el número de patentes que sobreviven una edad determinada, como el número de patentes que se mantienen en vigor después de dieciocho años es bastante más elevado que el obtenido en otros estudios (Sánchez Padrón *et al.*, 1996)

4) «La divulgación es una característica distintiva de las patentes, pero resulta problemático determinar qué conocimiento exactamente se somete al dominio público. La patente codifica ciertos aspectos de una tecnología, pero debido a la imperfección del código puede llevar escondidos muchos elementos tácitos de la base de conocimiento, de manera que la divulgación efectiva es mucho menor que lo que cabría esperar. Las consecuencias de este elemento de confidencialidad pueden ser considerables, sobre todo para aquellos adelantos espectaculares que establecen nuevas configuraciones de diseño» (Metcalfé, 1995).

Por último, como ha demostrado convincentemente Foray (1992), los regímenes legales de patentes no pueden considerarse aisladamente, dado que están «vinculados a otros elementos de diversidad que conciernen a los modelos de innovación y a las disposiciones legales y administrativas que rigen la explotación co-

mercial de la propiedad intelectual. La viabilidad de los regímenes nacionales (es decir, su capacidad para reconciliar la protección y la difusión, y por tanto para asumir el papel de coordinación general de las actividades innovadoras) depende de cómo encajen con los sistemas específicos de innovación de cada país».

Pasando ahora a las cuestiones relacionadas con nuestro trabajo, la primera pregunta, y la más general, que hay que hacer está relacionada con la cuestión del interfaz ciencia/ tecnología o, más concretamente, la contribución de la ciencia a la industria. Para evaluar dicha contribución, Narin y Frame (1989) y Narin y Olivastro (1992) han utilizado la frecuencia con que las patentes estadounidenses, originales de una serie de países, contienen citas a publicaciones distintas de las patentes⁴². Siguiendo su mismo enfoque, hemos obtenido información sobre el número de patentes para algunas categorías de instrumentos presentadas en la Oficina Europea de Patentes. Las categorías seleccionadas son aquéllas que podrían corresponderse con los dos instrumentos estudiados.

Con respecto al Cuadro 6, es interesante destacar que las patentes de instrumentos que contienen el mayor número de citas de publicaciones ajenas a las patentes (G01R, G02B, G02F -columna 7-) son precisamente las que podrían estar más estrechamente relacionadas con la astrofísica. Sin embargo, para ser más precisos en nuestros hallazgos, tenemos que profundizar en las cifras presentadas e:

a) Identificar los instrumentos específicos que han sido patentados en las distintas categorías.

b) Localizar la bibliografía ajena a las patentes que ha sido citada en las categorías relevantes.

En cualquier caso, estamos completamente de acuerdo con la opinión de que «aunque sugerentes, [las pruebas aportadas por el procedimiento de Narin *et al.*], tienen sus limitaciones» (Pavitt, 1991). Más concretamente, «la búsqueda de una descripción cuantitativa de la relación [ciencia-tecnología] y de las características que las distinguen, parece por el momento algo prematura y, además, plantea cuestiones de principios en cuanto a si los posibles hallazgos cuantitativos pueden llegar a ser algo más que simples artefactos del método de medición». En opinión de Rabkin, «las cuestiones específicas sobre cómo las entidades denominadas 'ciencia' y 'tecnología' interactúan pueden y deben describirse tanto cualitativa como cuantitativamente. Más que buscar una fórmula amplia de interfaz ciencia-tecnología, podemos desempeñar un trabajo mucho más útil investigando y comparando casos discretos de dicho interfaz» (Rabkin, 1981). De hecho, siguiendo las sugerencias de Rabkin, una de las principales prioridades en las siguientes etapas de nuestra investigación es identificar la bibliografía específica más frecuente-

42. Es innecesario decir que sus hallazgos, además de aportar algunas pruebas cuantitativas sobre la contribución de la ciencia a la industria, están directamente relacionadas con la cuestión de la conversión de un bien público latente en un bien privado. Desgraciadamente, estos autores no abordan esta última cuestión.

CUADRO 6
FUENTES DE CITAS DE ALGUNOS INFORMES DE SOLICITUD DE PATENTES DE INSTRUMENTOS DE LA OFICINA EUROPEA DE PATENTES, 1978-1993

Subsección CIP 5*	Con informe de búsqueda	Citando patentes	Citando literatura «no patente»	Citando patentes japonesas	Citando otras	Citando sólo patentes	Citando literatura «no patente»
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
GO1P	1316	1297	486	205	281	830	19
GO1R	4483	4273	2629	707	1922	1854	210
GO1S	2397	2347	1233	357	876	1164	50
GO2B	6880	6637	3721	2316	1405	3159	223
GO2F	3007	2751	2148	1187	961	859	256

Leyenda :

GO1P: Medidores de velocidad lineal o angular, aceleración, desaceleración, o shock; Indicadores de la presencia, ausencia, o dirección del movimiento.

GO1R: Medidores de variables eléctricas; Medidores de variables magnéticas.

GO1S: Medidores de velocidad, distancia, localización o búsqueda de dirección mediante ondas de radio; Sistemas de navegación por ondas de radio; Sistemas análogos que emplean otras ondas.

GO2B: Elementos, sistemas o aparatos ópticos.

GO2F: Mecanismos o arreglos cuya modificación óptica es modificada cambiando las propiedades ópticas del medio del mecanismo o arreglo, para el control de la intensidad, color, fase, polarización o dirección de la luz, por ejemplo encendiendo, modulando, desmodulando; Técnicas o procedimientos de lo mismo; Cambio de frecuencias; Óptica no lineal; Elementos «optical logic»; Conversor óptico análogo/digital.

Notas:

(1) Citando patente y/o literatura «no patente». Por tanto, la columna (1)=(2)+(7).

(2) La literatura «no patente» cubre las revistas científicas, etc., pero también resúmenes de patentes japonesas, chinas y de países del Este. Por tanto, la columna (3)=(4)+(5).

(3) Citando sólo patentes. Por tanto, la columna (7)=(1)-(2).

Fuente: Contenidos de la Sección G (Física). Subsección Instrumentos. CIP-Clasificación Internacional de Patentes (5ª edición, 1989).

mente citada en las categorías que se corresponden con la astrofísica. A este respecto, es importante destacar qué parte de la bibliografía sobre astrofísica trata del desarrollo de instrumentos.

La segunda cuestión, más específica, está relacionada con la forma concreta de 'apropiación' -aparte de la patente- revelada por nuestros casos:

1) Como se recordará, el grupo sueco del IAC ha sido incapaz hasta el momento de construir un correlador solar que alcance el nivel del desarrollado por el IAC. Dado que ya se han publicado varios trabajos sobre el correlador solar del IAC, ello implica, como ya se señaló en la sección 4.2, que esta innovación podría estar adecuadamente 'protegida' porque contiene elementos específicos de la institución y porque la información está insuficientemente codificada, lo que dificul-

ta la reproducción. Obsérvese, sin embargo, que el CS no podía patentarse debido a la publicación del artículo que describía su desarrollo.

2) Los datos generados mientras el correlador solar estaba siendo construido y desarrollado «darían trabajo para dos años a los astrofísicos del equipo implicado en el trabajo» (entrevista con el Dr. Collados). Dada la 'norma de la prioridad' que rige el mundo académico, esto proporciona la ventaja de «ser los primeros». Existe una norma informal en la Astrofísica: el equipo de investigación que genera datos mediante observaciones desde telescopios terrestres tiene un año de 'privacidad' en relación con el uso de dichos datos. Respecto a los datos obtenidos mediante satélites, el periodo podría variar de seis meses a dos años⁴³.

3) De Solla Price (1984) ha llamado la atención sobre el hecho de que «algunas pruebas anecdóticas sugieren que una nueva técnica se transfiere muy rápidamente de un laboratorio a otro, de universidades a industrias, y de país a país, porque los principales centros de investigación forman parte de un gran circuito de intercambio de visitantes que rápidamente captan estos temas vitales». La prueba ofrecida por el correlador solar puede actuar como un 'lubricante' del intercambio de información. De hecho, la patente bien podría dificultar el 'trueque' de información científica.

La anterior discusión nos llevó a preguntarnos hasta qué punto la actual preocupación por las patentes está realmente justificada: ¿se trata de una preocupación no sólo exagerada (un efecto secundario de la política estadounidense con respecto a los TRIPs⁴⁴), sino también fuera de lugar, en la medida en que nos lleva a identificar erróneamente las cuestiones relevantes? Creemos que es así por las siguientes razones:

a) Se ignoran otras formas de 'apropiabilidad por parte de los científicos' que vale la pena explorar.

b) Se podría obstaculizar -e interferir con- el libre flujo de información entre científicos, lo que llevaría a efectos secundarios adversos.

c) Se tiende a situar la contribución de la ciencia básica exclusivamente en el ámbito de la patente, a pesar de que hay otras contribuciones que podrían ser más importantes.

Cuestiones de política económica y agenda para una investigación más profunda

A modo de conclusión, nos gustaría recordar ciertas cuestiones de política económica que, de una u otra forma, han sido mencionadas en este trabajo. Para

43. Existe un caso extremo con el satélite Hipparcos, en el que el periodo de privacidad ha durado más de cinco años.

44. Trade related intellectual property rights.

no abusar de la paciencia de los lectores de un trabajo que resulta ya demasiado extenso, nos limitaremos a presentar un listado de dichas cuestiones.

1) Como ha puesto de manifiesto Rosenberg, la transferibilidad de los resultados de la investigación básica (y no tan básica) requiere recursos humanos dedicados específicamente a ella. No puede, ni debe, esperarse que los científicos: a) estén constantemente pensando en posibles aplicaciones prácticas de sus actividades, ni b) tengan la información necesaria sobre dichas aplicaciones. La primera tarea les apartaría de sus investigaciones, mientras que la segunda se encuentra, *normalmente*, más allá de sus aptitudes profesionales.

Sin embargo,

2) Si se dedican recursos específicos a a) y b), entonces sugerimos que las potenciales aplicaciones externas de la labor del IAC deben entrar a formar parte de la primera etapa de su planificación de la investigación.

3) La existencia de recursos humanos específicos dedicados a la transferibilidad garantizarán la identificación de las reservas potenciales de conocimiento científico-técnico y de instrumentación que deben ya existir en el IAC, 'esperando' a ser transferidas. Un paso inicial en esta dirección puede ser la identificación de los *clusters* del conocimiento básico del IAC publicado en las revistas citadas en los trámites de solicitud de patentes.

Por último, el conjunto de cuestiones a abordar en futuras investigaciones puede agruparse bajo los siguientes encabezamientos:

1) El análisis estructural del sector de instrumentación científica⁴⁵. Las siguientes preguntas sugieren un proyecto de investigación por sí mismas: ¿hasta qué punto es importante la influencia que el sector de los instrumentos científicos ejerce sobre la innovación y el avance científico?; la comparación de dicha influencia con sus dimensiones en términos económicos y de mano de obra; sus características interindustriales⁴⁶; un estudio comparativo internacional; ¿qué implicaciones políticas pueden derivarse de las anteriores preguntas?

2) Creación de instituciones. Para justificar este aspecto, basta con recordar la cita de Pavitt (1991) al comienzo de este artículo: «¿las instituciones de investigación grandes y productivas son buenas porque son grandes, o son grandes porque son buenas?; ¿cuáles son las características de las instituciones productivas? ¿Hasta qué punto resultan de habilidades científicas y de gestión acumuladas?; y ¿cuál es la unidad organizacional adecuada en la cual se acumulan dichas habilidades?»

45. Este es un punto más general que ha derivado como secuela de la presente investigación.

46. En Sánchez García (1990) y Sánchez García y Gossling (1996) se ofrece un enfoque metodológico para estructurar este punto.

3) La gestión de los recursos locales. La manera en que el IAC está gestionando el cielo canario como recurso científico podría ofrecer aportaciones con respecto a otros recursos locales⁴⁷.

4) El medio externo. ¿Cuáles son las condiciones sociales y económicas necesarias -aparte del IAC- que facilitan la 'absorción' del conocimiento básico, el conocimiento científico-técnico y los instrumentos producidos por el IAC? ¿Cómo pueden mejorarse estas condiciones?

5) Interacción internacional y nacional. Aunque sea necesario introducir ciertos matices a la hora de aplicar el concepto de Sistemas de Innovación Nacionales a las condiciones españolas⁴⁸, pensamos que sería interesante analizar el acoplamiento del IAC en el Sistema de Innovación español. ¿Hasta qué punto se ve afectado este 'acoplamiento' por la 'internacionalidad' del IAC?

Por último, el reto que el IAC tiene ante sí hoy con la construcción y el funcionamiento del telescopio de 10 metros implica un cambio de escala. ¿Significará la construcción y el funcionamiento del telescopio una desviación excesiva del IAC hacia un centro de alta tecnología, más que de investigación científica? ¿Qué consecuencias traerá? ¿Afectarán al actual conjunto de líneas de investigación del IAC y a sus necesidades instrumentales las demandas que la construcción y funcionamiento del mismo hagan del Instituto? ¿Cómo, en última instancia, incidirá el cambio de escala en la estructura y relaciones internas del IAC? La forma en que el IAC resuelva estas cuestiones marcará su trayectoria futura.

BIBLIOGRAFÍA

- ACKERMAN, R. (1985), *Data, Instruments, and Theory*, Princeton University Press, Princeton.
- AGUILERA, F., A. BRITO, C. CASTILLA, A. DÍAZ, J. HERNÁNDEZ-PALACIOS, A. RODRÍGUEZ, F. SABATÉ y J. SÁNCHEZ (1994), *Canarias. Economía, Ecología y Medio Ambiente*, Francisco Lemus Editor, La Laguna.
- ARROW, K. (1962), «Economic Welfare and the Allocation of Resources for Invention», en K. ARROW, *The Rate and Direction of Inventive Activity*, Princeton University Press, Princeton.
- BAIR, E. (1962), *Introduction to Chemical Instrumentation*, McGraw-Hill Book Co. New York.
- BAIRD, D. y T. FAUST (1990), «Scientific Instruments, Scientific Progress and the Cyclotron», *British Journal for the Philosophy of Science*, 41, pp. 147-175.
- BALLESTEROS, E., F. LORENZO, T. VIERA, M. REYES y J.A. BONET (1994a), «The Electronic Design of a Solar Correlation Tracker Based on a Video Motion Estimation Processor», *Microprocessors and Microsystems*, 18, 5, p. 243.

47. Ver Aguilera et al. (1994).

48. Ver Sánchez Padrón (1991) para dichos matices.

- BALLESTEROS, E., T. VIERA, F. LORENZO, M. REYES, J.A. BONET y C. MARTÍN (1994b), «Active Compensation of Global Wavefront Tilts at Solar Telescopes: Present Status of an Electronic Development», en D. M. ALLOIN y M. MARIOTTI, eds., *Adaptive Optics for Astronomy*, Corse, France.
- BARRY, A. (1991), «Technical and Political Change in Basic Research: the Case of the European X-Ray Observatory Satellite», *Research Policy*, 20, pp. 261-273.
- BÖHME, G., W. VAN DEN DAELE Y W. KROHN (1978), «The Scientification of Technology», en W. KROHN, E. LAYTON y P. WEINGART, eds., *The Dynamics of Science and Technology*, D. Reidel Publishing Co. Dordrecht.
- BOYD, R. (1968), «United Kingdom Space Science in the 1970s», *Proceedings of the Royal Society of London*, A308, pp. 145-156.
- CIMOLI, M. y G. DOSI (1992), «Tecnología y desarrollo. Algunas consideraciones sobre los recientes avances en la economía de la innovación», en M. GÓMEZ URANGA, M. SÁNCHEZ PADRÓN y E. DE LA PUERTA (comps.), *El Cambio Tecnológico hacia el Nuevo Milenio*, Icaria, Barcelona.
- COLLADOS, M. (1995), «El Correlador Solar en la VTT», *IAC Noticias*, 2 y 3, pp. 14-15.
- CORNISH, W. (1993), «The International Relations of Intellectual Property», *Cambridge Law Journal*, 52(1), pp. 46-63.
- DASGUPTA, P. (1987), «The Economic Theory of Technology Policy: an Introduction», en P. y P. STONEMAN (eds.), *Economic Policy and Technological Performance*, Cambridge University Press, Cambridge.
- DASGUPTA, P. y P. DAVID (1987), «Information Disclosure and the Economics of Science and Technology», en G. FEIWEL, ed., *Arrow and the Ascent of Modern Economic Theory*, Macmillan Press, Londres.
- DE SOLLA PRICE, D. (1984), «The Science/Technology Relationship, the Craft of Experimental Science, and Policy for the Improvement of High Technology Innovation», *Research Policy*, 13, pp. 3-20.
- DOSI, G. (1988), «Sources, Procedures, and Microeconomic Effects of Innovation», *Journal of Economic Literature*, 26, pp. 1120-1171.
- FELLER, I. (1990), «Universities as Engines of R&D-Based Economic Growth: they Think they Can», *Research Policy*, 19, pp. 335-348.
- FORAY, D (1992), «The Economics of Intellectual Property Rights and Systems of Innovation: the Inevitable Diversity», Paper Prepared for the Conference «Maastricht Revisited», MERIT, mimeo.
- GREENAWAY, F. (1978), «Instruments», en T. WILLIAMS (ed.), *A History of Technology*, Vol. VII, Clarendon Press, Oxford.
- INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS (IAC) (1983), *Recommendations About the Future of the Investigation at the IAC*, Publicaciones, Serie c-No. 3, La Laguna.
- IRVINE, J. Y B. MARTIN (1983), «Assessing Basic Research: the Case of the Issac Newton Telescope», *Social Studies of Science*, 13, pp. 49-86.
- IRVINE, J. (1991), «Promoting Innovation in Scientific Instruments: Some Lessons for Government Policy», *Science and Public Policy*, 18, pp. 181-195.

- LEVIN, R., A. KLEVOVICK, R. NELSON y S. WINTER (1987), «Appropriating the Returns to Industrial R and D», *Brookings Papers on Economic Activity*, 3, Brookings Institution.
- MACHLUP, F. (1958), *An Economic Review of the Patent System*, Government Printing Office, Washington, D.C.
- MANSFIELD, E. (1991), «Academic Research and Industrial Innovation», *Research Policy*, 20, pp. 1-12.
- MANSFIELD, E., M. SCHWARTZ y S. WAGNER (1981), «Imitation Costs and Patents. An Empirical Analysis», *Economic Journal*, 91, pp. 907-918.
- MARTIN, B. y J. IRVINE (1981), «Spin-off from Basic Science: the Case of Radioastronomy», *Physics Technology*, 12, pp. 204-212.
- MCKEITH, C., R. GARCÍA LÓPEZ, R. REBOLO, E. BARNETT, J. BECKMAN, E. MARTÍN y J. TRAPERO (1993), «IACUB: a New Echelle Spectrograph for Use at the Observatorio del Roque de los Muchachos», *Astronomy and Astrophysics*, 273, pp. 331-337.
- METCALFE, J. (1995), «The Economics Foundations of Technology Policy: Equilibrium and Evolutionary Perspectives», en P. STONEMAN, ed., *Handbook of Economics of Innovation*, Basil Blackwell, Oxford.
- NARIN, F. y J. DAVIDSON FRAME (1989), «The Growth of Japanese Science and Technology», *Science*, 245, pp. 600-604.
- NARIN, F. y D. OLIVASTRO (1992), «Status Report: Linkage Between Technology and Science», *Research Policy*, 21, pp. 237-249.
- NELSON, R. (1989), «What is Private and What is Public About Technology», *Science, Technology, & Human Values*, 14(3), pp. 229-241.
- OECD (1987), *Structural Adjustment and Economic Performance*, OECD, Paris.
- PAVITT, K. (1991), «What Makes Basic Research Economically Useful?», *Research Policy*, 20, pp. 109-119.
- PÉREZ, C. (1988), «Microelectronics Waves, Long Waves and the World Structural Change. New Perspectives for Developing Countries», *World Development*, 13(3), pp. 441-463.
- PIAZZI SMITH, C. (1858), «Astronomical Experiment on the Peak of Teneriffe, Carried out Under the Sanction of the Lords Commissioners of the Admiralty», *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 148, pp. 465-533.
- PORTELLANO, P. (1995), «La valoración del sistema de patentes : una enseñanza para el derecho de la competencia desleal», *Revista General de Derecho*, pp. 625-637.
- RABKIN, Y. (1981), «Science and Technology: Can One Hope to Find a Measurable Relationship?», *Fundamenta Scientiae*, 2(3/4), pp. 413-423.
- RIGGS, W. y E. VON HIPPEL (1994), «Incentives to Innovate and the Sources of Innovation: the Case of Scientific Instruments», *Research Policy*, 23, pp. 459-469.
- RIMMELE, TH., O. VON DER LUHE, P. WIBORG, A. WIDENER, R. DUNN y G. SPENCE (1991), «Solar Feature Correlation Tracker», European Southern Observatory Technical Report 30.

- ROSENBERG, N. (1976), «La dimensión del cambio tecnológico, mecanismos de inducción y sistemas de enfoque», en N. ROSENBERG, *Tecnología y Economía*, ed. Gustavo Gili, Barcelona.
- (1982), *Inside the Black Box : Technology and Economics*, Cambridge University Press, Cambridge.
- (1992), «Scientific Instrumentation and University Research», *Research Policy*, 21, pp. 381-390.
- (1994), «Critical Issues in Science Policy Research», en N. ROSENBERG, *Exploring the Black Box. Technology, Economics, and History*, Cambridge University Press, Cambridge.
- ROTHBART, D. Y S. SLAYDEN (1994), «The Epistemology of a Spectrometer», *Philosophy of Science*, 61, pp. 25-38.
- SÁNCHEZ GARCÍA, J. (1990), «The Arrival of New Activities and the Dual Forward-Looking Edition of the (Improved) Leontief Dynamic Inverse», en E. CICIOTTI, N. ALDERMAN y A. THWAITES, (ed.), *Technological Change in a Spatial Context*, Springer Verlag, Heidelberg.
- SÁNCHEZ-GARCÍA, J. y W.F. GOSSLING (1996), «Economics» Politics : The Future of Future Prices», en T. RADER, *Economics with No Special Technology (posthumous essays + selected articles)*, Appendix I, Input-Output Publishing Co., Newcastle upon Tyne.
- SÁNCHEZ MARTÍNEZ, F. (1981), «El cielo como recurso», en Instituto de Desarrollo Regional, ed., *Canarias ante el Cambio*, Banco Bilbao/Universidad de La Laguna, La Laguna.
- SÁNCHEZ PADRÓN, M. (1991), «El cambio tecnológico», en M. ETXEZARRETA, ed., *La Reestructuración del Capitalismo en España*, Icaria: Fuhem, Barcelona/Madrid.
- (1995), «La innovación y la tecnología en la economía canaria: una aproximación a sus islotos innovadores», *Papeles de Economía. Economía de las Comunidades Autónomas. Canarias*, 15, pp. 267-274.
- SÁNCHEZ PADRÓN, M. y J. SÁNCHEZ GARCÍA (1995), «Estudio sobre los factores económicos y de política científica y tecnológica relacionados con la construcción del Gran Telescopio», anexo 11 del *Estudio de Viabilidad del Gran Telescopio para el Observatorio del Roque de los Muchachos*, Instituto de Astrofísica de Canarias, La Laguna.
- (1996), «IAC. Complejidad de un centro de investigación», *Investigación y Ciencia*, 241 (octubre), pp. 78-82.
- SÁNCHEZ PADRÓN, M., V. CANO FERNÁNDEZ y E. LOS ARCOS (1996), «An Analysis of EPO Renewals : a First Step Towards Patent Value Estimation. Some Conceptual Considerations», Applied Econometrics Association, 54th International Conference, 25 noviembre, Luxemburgo.
- SCHANKERMAN, M. y A. PAKES (1986), «Estimates of the Value of Patent Rights in European Countries during Post 1950 Period», *The Economic Journal*, 96, pp. 1052-1076.
- SMOOT, G. y K. DAVIDSON (1993), *Wrinkles in Time*, Little, Brown and Co., Londres.
- SPITAL, F. (1979), «An Analysis of the Role of Users in the Total R&D Portfolios of Scientific Instrument Firms», *Research Policy*, 8, pp. 284-296.
- TAYLOR, C. y A. SILBERSTON (1973), *The Economic Impact of the Patent System*, Cambridge University Press, Cambridge.

- UTTERBACK, J. (1971), «The Process of Innovation: a Study of the Origination and Development of Ideas for New Scientific Instruments», *IEEE Transactions on Engineering Management* EM-18, pp. 124-131.
- VON HIPPEL, E. (1976), «The Dominant Role of Users in the Scientific Instrument Innovation Process», *Research Policy*, 5(3), pp. 212-239.
- VON DER LUHE, O., A. WIDENER, TH. RIMMELE, G. SPENCE, R. DUNN y P. WIBORG (1989), «Solar Feature Correlation Tracker for Ground-Based Telescopes», *Astronomy and Astrophysics*, 224, pp. 351-360.
- WEINBERG, A. (1963), «Criteria for Scientific Choice», *Minerva*, 1, pp. 159-171.



Paths of Technical Change: The Canarian Institute of Astrophysics as a Case Study

ABSTRACT

Although science policies have for long been the subject of academic concern, there are many issues that still bewilder scholars of science and technology. This paper takes the Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) to probe into these issues. We have analyzed the innovation and development of two scientific instruments as a point-of-entry into the complexity of astrophysical research. This analysis has provided us with evidence: (a) to start mapping out the forces behind the technological trajectories that go from big science to instrument development; (b) to enquire into the appropriateness and potential negative side effects of the recent pressures made on public institutions to patent the results of their research. We end up underlining some policy issues brought out by our field work and with an agenda for further research.

