



EL ESTADO DE LA ASTRONOMÍA EN MÉXICO

I. Aretxaga
15 agosto 2008

Índice

1. Antecedentes
 - 1.1. La astronomía
 - 1.2. Breve historia de la astronomía en México
2. Situación Actual
 - 2.1 Demografía de la astronomía mexicana
 - 2.2 Productividad y reconocimiento de la labor investigadora
 - 2.3 Líneas de investigación
 - 2.4 Infraestructura operativa
 - 2.5 Formación de recursos humanos de alto nivel
3. Infraestructura astronómica para la siguiente década.
 - 3.1 El Gran Telescopio Milimétrico
 - 3.2 El *extended Very Large Array* y el acceso a la infraestructura radio estadounidense
 - 3.3 El Gran Telescopio Canarias
 - 3.4 Nuevas iniciativas
 - 3.4.1 Un nuevo telescopio óptico-IR para San Pedro Mártir
 - 3.4.2 El *Very Large Baseline Array*
 - 3.4.3 El *Square Kilometer Array*
 - 3.4.4 El *World Space Observatory*
4. Retos planteados
 - 4.1 Maximización del retorno científico/tecnológico obtenido con la nueva infraestructura
 - 4.1.1 GTC
 - 4.1.2 GTM
 - 4.1.3 Control participativo en los órganos de decisión
 - 4.2 Vertebración del capital humano
 - 4.3 Vertebración de órganos académicos nacionales de discusión y consejo
 - 4.4 Cambio necesario del entorno de política científica

1. Antecedentes

1.1. La astronomía

La astronomía es una de las primeras ciencias practicadas por la humanidad. Tiene como objetivo explicar los mecanismos de evolución de los astros y del Cosmos mismo. Nuestra inquietud por conocer de dónde venimos y a dónde vamos es tan universal que puede especularse que es innata a la condición humana. Todas las culturas del mundo han desarrollado alguna teoría sobre el origen del Universo, la creación de la Tierra, el papel de la humanidad en el Cosmos, y desde tiempo inmemorial han tornado su mirada al cielo y buscado respuestas en las estrellas al origen de la Tierra y de la vida misma. En nuestros tiempos, esta búsqueda es una empresa científica y no mítica.

La astronomía captura nuestra imaginación y curiosidad y es un fuerte aliciente para inculcar a la ciudadanía una metodología científica que rebasa las limitaciones y carencias del conocimiento descriptivo del pasado, y reposa en el razonamiento crítico, y en los principios de comprobación empírica y de deducción, bajo lo que venimos llamando método científico. La astronomía es una ciencia con tanto atractivo que quizá sea la única en contar con grupos organizados de aficionados sin preparación académica rigurosa que la practican. Los astrónomos aficionados o amateur observan los cielos por el puro placer de hacerlo, pero además constituyen un valioso grupo de descubrimiento y seguimiento de fenómenos transitorios, de utilidad profesional. A pesar de esta faceta de aparente sencillez y accesibilidad al público general, la astronomía es una ciencia compleja, con fuertes vínculos con las ciencias afines. Se nutre del desarrollo y aglutinación del conocimiento generado, principalmente, en las áreas de la física, matemáticas, química, biología y geología, hasta el punto que hoy en día hablamos de astrofísica, a la que se asocia la mayoría de los astrónomos modernos, pero también de astroquímica, astrobiología y planetología. De la relación con ciencias afines se generan ejemplos tangibles de teorías básicas abstractas: fenómenos tales como el movimiento de los planetas o la amplificación de las imágenes de galaxias distantes por cúmulos cercanos de galaxias no son sino manifestaciones de la fuerza de la gravedad; y la estructura interna de una estrella puede ser descrita por una sencilla ecuación diferencial, soluble por estudiantes avanzados de preparatoria. Ésta es sólo una muestra clásica de cómo la astronomía se beneficia del crecimiento de las otras ciencias, y ofrece aplicaciones visuales atractivas a los estudiantes de ciencias e incluso al ciudadano curioso por el Universo que le rodea.

La astronomía, así mismo, ofrece caminos de progreso y nuevos retos a las ciencias afines. En ocasiones con descubrimientos que deben encajarse en el entramado de las fuerzas y constituyentes fundamentales de la naturaleza, como la propuesta de existencia de materia y energía oscura develada por las curvas de rotación de galaxias cercanas y por el brillo de las supernovas a grandes distancias cosmológicas. También resalta carencias técnicas como la de nuevos métodos computacionales que permitan solucionar el transporte radiativo en las condiciones físicas extremas de los frentes de choque del medio interestelar. Sin embargo, quizá el campo al que mayores retos plantea sea al ámbito tecnológico. Con frecuencia, para superar nuevas fronteras del conocimiento, se necesita construir infraestructura de grandes proporciones y dotarla de instrumentos sofisticados que suponen desafíos concretos en ingeniería punta. Esta nueva tecnología, desarrollada para satisfacer los requerimientos impuestos por un caso científico exigente, suele encontrar aplicaciones en el orden civil o empresarial de forma espontánea, aunque el retraso hasta consolidarla en tecnología de consumo puede llevar varias décadas, y para entonces ya viene liderada por otros cuerpos académicos. En este sentido, el desarrollo de los dispositivos de carga acoplada y el tratamiento de imagen requerido para utilizarlos, que invaden la vida del ciudadano (tecnología de imagen digital), sirve como ejemplo de una de las muchas aplicaciones que han surgido de instrumentación diseñada para hacer progresar la ciencia básica, y que tienen un impacto en la sociedad y en la industria de consumo. También en México, instrumentos para imprimir moneda nacional o los nuevos sensores y posicionadores de la flota de la Armada, han sido diseñados y fabricados por instrumentistas con formación astronómica.

Dejando a un lado sus posibles aplicaciones económicas, la astronomía es una ciencia básica que debe ser cultivada en el siglo XXI, también por los países en vías de desarrollo, simplemente, porque es parte del propio crecimiento humano y soporte de una visión crítica sobre cuál es nuestro lugar en el orden cósmico. Sólo aceptando y resolviendo retos intelectuales abstractos crecerá la calidad del conocimiento de frontera generado, y con ella la capacidad de innovación del país. El vínculo natural de la astronomía con la sociedad está, de todas formas, como para la mayoría de las ciencias básicas, en el orden educativo.

1.2 Breve historia de la astronomía en México

La astronomía en México se practica desde la época mesoamericana, cuando la cronología y la elaboración de un calendario preciso constituyeron unas de las motivaciones básicas para su estudio, probablemente ligadas a la necesidad de predecir las estaciones para el cultivo. Los antiguos astrónomos mesoamericanos observaron y predijeron con gran precisión eclipses y posiciones planetarias, lunas llenas y nuevas, y el advenimiento de equinoccios y solsticios. El célebre calendario azteca desarrollado por esta civilización es, de hecho, más preciso que el calendario gregoriano que utilizamos en la actualidad⁽¹⁾.

Si bien hubo ilustres mexicanos que practicaron actividades astronómicas durante todas las épocas de la historia^(2,3,4), no fue sino hasta 1878 que el primer observatorio profesional dotado de telescopios se inauguró en el país: el Observatorio Astronómico Nacional (OAN). Su primer emplazamiento fue el Castillo de Chapultepec, para pasar 14 años más tarde a Tacubaya, ambos sitios en la Ciudad de México. Las principales actividades astronómicas que se acometieron fueron la determinación de posiciones, la predicción de efemérides, y más tarde la obtención de fotometría óptica, especialmente la recolectada para el proyecto internacional "La carta del cielo", que se completó en México en 1964, aunque para entonces ya había sido sobrepasada por la cartografía obtenida en Monte Palomar⁽³⁾. En 1929 el OAN pasó a la custodia de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

En México el comienzo de la astronomía moderna, entendida como el estudio predictivo e interpretativo de los mecanismos de funcionamiento de los astros, data de 1942, cuando se inauguró el Observatorio Astrofísico Nacional de Tonantzintla, en las afueras de la ciudad de Puebla^(5,6,3). En su tiempo albergó una de las cámaras Schmidt más grandes del mundo, lo que llevó al descubrimiento de los objetos protoestelares Haro-Herbig, las estrellas ráfaga y las galaxias azules con líneas de emisión. A principios de los 40 había un solo doctor en astronomía en el país⁽⁷⁾, la Dra. Pişmiş, pero el caldo de cultivo para desarrollar la astrofísica se propició incluso antes de su llegada a México a través del choque generacional entre las figuras clave de Joaquín Gallo y Luis Enrique Erro y, más tarde, la entrada en escena de Guillermo Haro.

En los 50 comienza un incipiente crecimiento de la comunidad astronómica nacional. Los pocos astrónomos del momento empiezan a impartir cursos optativos en la carrera de física, y dirigen tesis de licenciatura de estudiantes interesados que, una vez motivados para trabajar en el área, se los envía al extranjero para obtener maestrías y doctorados en instituciones líderes del área. La mayoría de estos estudiantes, una vez graduados, volvieron al país para engrosar principalmente la planta del Instituto de Astronomía de la UNAM (IA-UNAM), creado en 1967, y en menor medida la del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), el nuevo centro surgido en 1971 del Observatorio Astrofísico Nacional de Tonantzintla. Este último fue el primer centro de investigación establecido fuera de la Ciudad de México, iniciando con ello la descentralización de la investigación en astronomía, si bien los observatorios ya habían salido de la capital décadas antes⁽⁷⁾. En los años 80 astrónomos recién doctorados en el extranjero se incorporan a la sede del IA-UNAM en Ensenada,

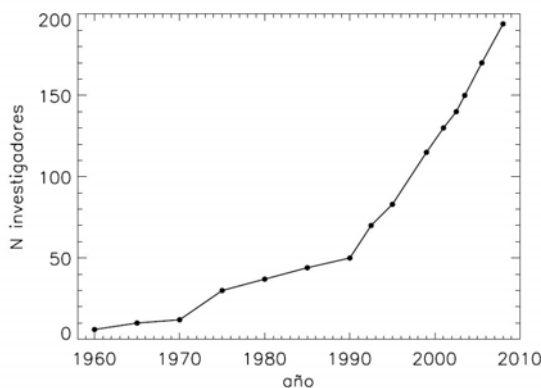


Figura 1: Crecimiento del número de investigadores de astronomía en México (figura adaptada de Peimbert y Rodríguez⁽³⁾, y actualizada a 1 de enero de 2008).

Baja California, fundada originalmente para dar apoyo al nuevo OAN en la sierra de San Pedro Mártir. En los 90 el INAOE fortalece su planta con investigadores jóvenes y destacados, en parte atraídos por el proyecto del Gran Telescopio Milimétrico y por el Programa Internacional de Astrofísica Avanzada Guillermo Haro de talleres de trabajo y conferencias anuales. La UNAM sigue su proceso de descentralización al crear en 1996 la Unidad Morelia del IA-UNAM, a la que se trasladan algunos de sus investigadores de gran trayectoria desde el Distrito Federal. En 2003 esta unidad se convierte en el Centro de Radioastronomía y Astrofísica de la UNAM (CRyA-UNAM). Otros grupos de astrónomos también se asentaron en provincia en esta época, especialmente en Guanajuato, Jalisco y Sonora.

El número de astrónomos nacionales ha crecido a lo largo de la historia a un ritmo lento pero decidido. Se ha tratado de incrementar la densidad de astrónomos del país sin

sacrificar la calidad de la investigación desarrollada. Las nuevas generaciones de astrónomos las engrosan, principalmente, doctores salidos de los postgrados de astronomía de México, una buena parte de los cuales han sido repatriados después de realizar estancias postdoctorales en el extranjero, y como en los comienzos, también doctores mexicanos formados en el extranjero. Alrededor de los 90, además, la astronomía mexicana empezó a atraer a doctores extranjeros para que pudieran integrarse en la comunidad nacional y, con ello, aunar fuerzas en la formación de recursos humanos y en la investigación de frontera realizada en el país⁽²⁾.

2. Situación actual

2.1 Demografía de la astronomía mexicana

El padrón 2008 de astrónomos profesionales asciende a 194 investigadores y profesores, doctores (93%) o maestros en ciencias (7%) en activo y unos 70 ingenieros y técnicos académicos de apoyo. En el censo de investigadores se han incluido los miembros del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) inscritos en la disciplina de Astronomía y Astrofísica, los declarados en las plantas de institutos y centros de investigación o departamentos de astronomía de universidades, los doctores graduados en México en los últimos 10 años que se dedican a labores académicas en centros nacionales de enseñanza superior, y otros, siempre que en los últimos 5 años hayan publicado algún resultado de investigación en revistas indexadas del área y no manifiesten que su actividad principal sea otra que la astronomía. El Cuadro 1 y Figura 2 recogen la distribución de las densidades de astrónomos por estado e institución. Además de estos investigadores, hay alrededor de una veintena de científicos registrados en las áreas de Física, Química, Biología y Geología del SNI que también realizan investigación en astronomía, y que no se han incluido en este padrón.

Los astrónomos se concentran principalmente en dos centros de la UNAM, el IA-UNAM con sedes en el Distrito Federal y en Baja California, y el CRyA-UNAM en Michoacán; y en un centro Conacyt, el INAOE en Puebla. Cada uno de estos centros cuenta con unos 20 a 50 astrónomos investigadores. Además, en esta década, las Universidades de Guanajuato, Guadalajara y Sonora han consolidado sus grupos de astronomía al formar departamentos o grupos departamentales de entre 10 y 5 investigadores. Otras universidades cuentan también con pequeños grupos de astrónomos establecidos dentro de sus departamentos o institutos de ciencias físicas. Un 13% de astrónomos, especialmente investigadores doctorados en los últimos 10 años, se encuentran esparcidos como individuos en otras universidades estatales y privadas del país, sin todavía haber formado departamentos o agrupaciones fuertes en esta disciplina dentro de sus instituciones.

El número de astrónomos profesionales en México es todavía muy pequeño por comparación con su población: aproximadamente 1 por cada 550.000 habitantes, a compararse con 1 por cada 50.000 en EEUU o 1 por cada 80.000 en España. Si bien Ciudad de México cuenta con un importante porcentaje del total de investigadores (37%), la astronomía es una ciencia que se encuentra relativamente descentralizada. Gracias a ello se realiza una tarea educativa conjuntamente con otros centros de enseñanza superior, y de divulgación y contacto directo con la ciudadanía en, al menos, 17 estados de la República. Incluso dentro del Distrito Federal, la tradicional concentración de astrónomos en el IA-UNAM se está diluyendo, al ser contratado un creciente número de astrónomos en otras dependencias de la UNAM y otros institutos de investigación y centros de educación superior públicos y privados de la capital. Si definimos el índice de concentración estatal como el porcentaje de astrónomos adscritos a la institución más numerosa del estado, encontramos que el Distrito Federal tiene el índice de concentración más bajo del país, de 72%. El 28% restante está repartido en 9 centros. Por comparación, en otros estados se encuentran índices de concentración del 86 al 100%.

Cuadro 1: Distribución de los investigadores de astronomía en México. Se detalla el número de investigadores y técnicos o ingenieros académicos adscritos a cada centro, y el porcentaje de miembros del SNI entre los mismos, a 1 de enero de 2008. En los institutos con varias sedes, los porcentajes del SNI son conjuntos para todas las sedes. Las columnas listan: (1) nombre de la institución, (2) estado en el que se localiza, (3) número de investigadores/profesores titulares de planta, (4) número de académicos asociados o en estancias postdoctorales, a los que denominados investigadores jóvenes (5), número de ingenieros o técnicos académicos a nivel titular o asociado, (6) porcentaje de académicos titulares y jóvenes en el SNI, (7) porcentaje de ingenieros y técnicos en el SNI, (8-11) porcentaje de los miembros del SNI en los niveles III, II, I y C.

Centro	Estado	Número inves. titular	Número inves. joven	Número ingenieros o técnicos	% SNI Inv.	% SNI. Ing. / Tec.	% SNI III	% SNI II	% SNI I	% SNI C
IA-UNAM (*)	DF	37	13	29	80%	4%	20%	44%	36%	0%
	Baja California	22	6	27	82%	7%	--	--	--	--
	Puebla	0	0	1	--	0%	--	--	--	--
INAOE(*)	Puebla	27	7	6	88%	17%	16%	38%	34%	12%
	Sonora	0	0	7	--	0%	--	--	--	--
CRyA-UNAM(*)	Michoacán	16	3	4	89%	0%	12%	53%	35%	0%
Univ. Guanajuato	Guanajuato	6	4	2	100%	0%	0%	20%	50%	30%
Otros grupos con menos de 10 profesores-investigadores titulares (**)	Baja California (1), Campeche (1), DF (20), Edo. de México (1), Guanajuato (1), Jalisco (4), Michoacán (3), Morelos (1), Nuevo León (1), Oaxaca (1), Puebla (3), Quintana Roo (1), San Luis Potosí (2), Sonora (5), Veracruz (1), Yucatán (1), Zacatecas (1)	49	(no se tiene el dato de si son titulares o asoci., y si lo fueran se suman a inves. titular)	(sin datos)	84%	--	5%	17%	46%	32%

(*) IA-UNAM son las siglas que representan al Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), INAOE las del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, CRyA-UNAM las del Centro de Radioastronomía y Astrofísica de la UNAM.

(**) Otros grupos comprenden: otras dependencias de la UNAM, Univ. Autónoma de Baja California, Univ. Autónoma del Carmen, Instituto Politécnico Nacional, Univ. Autónoma de México, Univ. Iberoamericana, Univ. Paraiba, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Univ. Guadalajara, Univ. Michoacana de San Nicolás Hidalgo, Univ. Intercultural Indígena de Michoacán, Gob. Michoacán, Univ. Monterrey, Univ. del Istmo, Benemérita Univ. Autónoma de Puebla, Univ. Quintana Roo, Univ. Autónoma de San Luis Potosí, Univ. Sonora, Univ. Veracruzana, Univ. Autónoma de Yucatán, y Univ. Zacatecas.



Figura 2: Porcentaje de investigadores de astronomía por estado.



Figura 3: Porcentaje de astrónomos miembros del SNI por estado.

A 1 de enero de 2008, el porcentaje de miembros del SNI entre los astrónomos establecidos en México antes de 2006 es del 92% (166 miembros). Si contabilizamos además los astrónomos repatriados o en contratos postdoctorales temporales (postdocs) que se han incorporado en los últimos 2 años a la planta investigadora del país, y que, o bien se encuentran tramitando su incorporación al SNI, o se espera vuelvan a salir del país, el porcentaje de astrónomos miembros del SNI es del 86%. La mayoría de estos investigadores recientemente

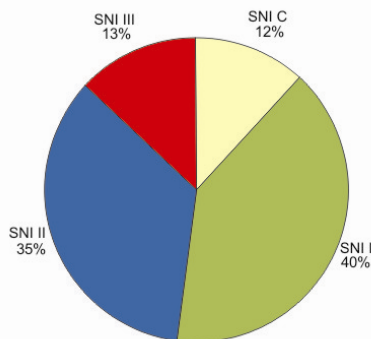


Figura 4: Porcentajes de miembros del SNI por niveles.

incorporados a la planta mexicana tienen un nivel equivalente a los SNI-C, I y II. Este factor corrector del porcentaje de miembros del SNI es claro en el IA-UNAM, que ha venido ejerciendo en los últimos años una ambiciosa política de contratación de postdocs nacionales y extranjeros, al estilo de los grandes centros de investigación internacionales. Si descontamos a los postdocs de su planta, el porcentaje de pertenencia al SNI es del 93%. Lo mismo puede decirse de los otros grandes centros de investigación en astronomía con investigadores jóvenes recientemente incorporados. La distribución de la densidad de astrónomos miembros del SNI por estado puede visualizarse en la Figura 3. Se aprecia que la descentralización de los SNI es comparable a la del total de astrónomos del país. La Figura 4 representa la división de los miembros del SNI en 4 categorías: C, I, II, III (incluye los E): el 48% de los miembros del SNI tienen niveles II y III.

La división de género, con un 23% de mujeres entre los miembros del SNI, es similar al 28% de nuevas licenciadas en física⁽⁸⁾, la principal disciplina fuente de nuevas generaciones de investigadores del área, si bien estos porcentajes están todavía lejos de la equidad de género. Se observa que un número considerable de astrónomas ocupan puestos de responsabilidad y decisión, y se les reconoce su labor investigadora y formativa al más alto nivel: un 33% de los SNI III son mujeres. Todas son miembros de algún centro de la UNAM. La proporción de mujeres entre los miembros del SNI adscritos a la UNAM es también superior a la de otros centros de investigación: 28% frente a 16%, aunque en estadísticas de números pequeños como ésta, diferencias mayores o iguales a la encontrada pueden ser producidas al azar en un 3.6% de muestras.

2.2 Productividad y reconocimiento de la labor investigadora

La astronomía en México está catalogada por Conacyt⁽⁹⁾ como la ciencia con mayor productividad e impacto inmediato del país en el quinquenio 2002-2006: 2% de la producción mundial en el área de conocimiento y 6.4 citas/artículo. A nivel nacional ocupa un segundo lugar en impacto inmediato relativo, calibrado con respecto al promedio mundial del área, dominado por la producción estadounidense, un 16% por debajo del referente mundial. En el periodo 1998-2002⁽¹⁰⁾ esta diferencia era sólo del 9%: 7.05 citas/artículo frente a 7.72 del promedio mundial. En 1981-1985 se situaba un 17% por encima del promedio mundial, con 5.56 citas/artículo⁽¹¹⁾. Analicemos estos datos en detalle con algunos referentes internacionales.

El nivel de productividad de los mayores centros de investigación nacionales en la actualidad es de entre 1.9 y 3.1 artículos de investigación/investigador/año (0.7 a 2.4 arbitrados) – véase el Cuadro 2. Por comparación, en el trienio 1999-2001 la moda en la distribución artículos/investigador/año en España⁽¹²⁾ era 0.7, con el 68% de los centros produciendo entre 0.3 y 1.1 artículos/investigador/año, y un intervalo total de entre 0.3 y 4.3.

El 88% de la producción científica en México aparece en revistas internacionales arbitradas. Además, desde 1974 los astrónomos del país cuentan con una revista mexicana indexada: la Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica (RevMexAA), editada por la UNAM. En la actualidad se encuentra dentro del conjunto de revistas especializadas del área en el lugar de impacto número 9. En 2003-2007 se ha mantenido al mismo nivel que revistas tales como *Acta Astronomica*, *Publications of the Astronomical Society of Japan* y *New Astronomy*, con un promedio de 2.5 citas/artículo. La RevMexAA publica artículos de la comunidad nacional e internacional, en inglés, y por lo tanto puede ser catalogada como revista internacional, aunque para los efectos de porcentajes de publicaciones internacionales de la comunidad mexicana, se ha considerado en esta sección como revista nacional. Además de la serie principal de artículos arbitrados, la revista cuenta con una popular serie de congresos, en la que se recogen las memorias de muchas de las conferencias internacionales organizadas en Iberoamérica. La RevMexAA es la revista científica con mayor impacto producida en México⁽⁹⁾. Hasta finales de

2006 también ha ocupado el primer puesto de impacto entre las revistas editadas en Latinoamérica en cualquier disciplina.

Cuadro 2: Resumen de la productividad investigadora y divulgadora de los mayores institutos y departamentos de investigación astronómica en México durante el periodo 2003-2007. Puesto que existen colaboraciones entre investigadores de diferentes institutos, algunos artículos están contabilizados en la productividad de dos o más centros.

Instituto	Investigación: artículos arbitrados	Investigación: artículos no arbitrados	Divulgación: libros y artículos
IA-UNAM	437	365	200
INAOE	243	189	14
CRyA-UNAM	228	72	40
U. Guanajuato	36	59	2

La productividad es sustancialmente mayor en los grandes centros de astronomía que entre el conjunto de astrónomos adscritos a centros más pequeños. También sus plantas son, en general, más experimentadas, si se atiende a la distribución de niveles SNI. En estudios bibliométricos publicados por la UNAM⁽¹³⁾ sobre todos sus centros del Subsistema de la Investigación Científica, el CRyA se ha destacado en el periodo 1997-2006 con un segundo puesto en productividad (~2.4 artículos arbitrados/investigador/año) y el primero en impacto (~60 “citas recibidas durante el periodo a cualquier artículo con autoría de los investigadores del centro”/“artículos publicados en el periodo”). En estudios realizados por el Conacyt⁽⁹⁾ entre sus centros de investigación, el INAOE ha sido clasificado en quinquenios consecutivos, del 2001 al 2006, en primer lugar de producción e impacto, aunque en esta estadística se refleja el conjunto de disciplinas practicadas en el INAOE, no sólo la astronomía.

La situación, sin embargo, es crítica en los centros de provincia con astrónomos aislados, donde se observa con preocupación que un número importante de graduados es incapaz de consolidar el ritmo de publicaciones mínimo como para mantenerse a largo plazo entre los cuadros del SNI (~1 artículo/año). Las probables razones para que hayan relajado su labor investigadora son una sustancial carga administrativa y lectiva, la apatía local ante la investigación y el aislamiento geográfico, bajo el que les resulta especialmente difícil mantener sus lazos con los grandes centros de astronomía del país o con otros del extranjero, e incentivar su investigación. Revertir esta perniciosa tendencia de abandono de la carrera investigadora entre los profesores de universidades de provincia es un asunto vital en México, donde la calidad de la enseñanza debe ser apuntalada en todos sus niveles, dados los pobres resultados en aplicación de conocimientos científicos por adolescentes mexicanos revelados por el *Program for International Student Assessment (PISA)* en 2006⁽¹⁴⁾, con un 50% de jóvenes por debajo del nivel de competencia mínimo establecido por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), y sólo un 0.3% en los 2 niveles máximos. La calidad de la enseñanza en estas universidades está comprometida si sus profesores no logran seguir investigando a un alto nivel y, con ello, actualizarse y transmitir altos estándares de análisis y razonamiento crítico a sus propios alumnos, que serán los futuros maestros de las nuevas generaciones por entrar en el sistema educativo nacional. Por contraste, existen alentadores ejemplos de universidades de provincia decididas a apoyar, fortalecer e incrementar su densidad de profesores-investigadores, como los muy exitosos casos de las Univ. de Guanajuato y Guadalajara, entre otras, con niveles de pertenencia al SNI incluso superiores a los de centros de mayor tamaño, y una productividad notable. Otros ejemplos alentadores, como la Univ. Iberoamericana, una entidad privada, vincula los estímulos económicos y la financiación de la investigación de su profesorado tanto a la cantidad y calidad de la docencia realizada como a las evaluaciones a las que los profesores-investigadores se someten dentro del SNI y de las convocatorias de proyectos de investigación, bajo arbitraje Conacyt.

El trabajo de los astrónomos es reconocido tanto dentro como fuera del país. No sólo hay un alto porcentaje de pertenencia al SNI entre los astrónomos establecidos en las plantas investigadoras mexicanas (92%), sino también a otras prestigiosas asociaciones científicas nacionales, como la Academia Mexicana de Ciencias (AMC, 50 miembros) o el Colegio Nacional (3 miembros). Varios astrónomos nacionales han recibido premios importantes de sociedades científicas mexicanas y extranjeras, tales como Premios Nacionales de Ciencias y Artes, Premios de la AMC, Premios de la Sociedad Mexicana de Física, de la *Third World Academy of Sciences (TWAS)*, o de la *American Astronomical Society*, y son miembros de exclusivas asociaciones de científicos tales como la *National Academy of Sciences* o la *American Philosophical Society* de EEUU. Muchos son, además,

repetidamente invitados a impartir conferencias o clases magistrales en congresos y escuelas de postgrado internacionales de alto nivel y, con frecuencia, se encuentra a astrónomos mexicanos en los órganos y comités internacionales de decisión y gestión⁽¹¹⁾. Una astrónoma mexicana es miembro del Comité Ejecutivo del más prestigioso gremio de astrónomos profesionales a nivel mundial, la Unión Astronómica Internacional.

La consolidación y reconocimiento internacional de la investigación desarrollada por la planta de astrónomos del SNI es alta, y puede estimarse a través de la distribución de citas a sus trabajos. El índice Hirsch⁽¹⁴⁾, h , que mide el número h de artículos que han acumulado un número de citas independientes $n \geq h$ es útil para este fin, y se está implantando rápidamente como un indicador de madurez de investigadores individuales o de agrupaciones de los mismos. El índice está altamente correlacionado con el número total de citas recibidas por un investigador a lo largo de su carrera, pero resalta especialmente a aquellos que tienen una variedad de trabajos reconocidos en su área de especialización. Como cualquier índice bibliométrico, debe ser calibrado para cada área con un promedio internacional, o con algunos ejemplos que sirvan de marcadores reconocidos de prueba. Por ser un índice de consolidación, refleja pobremente el desarrollo de los investigadores con una trayectoria breve, motivo por el cual, el análisis de reconocimiento que se presenta aquí usa sólo los índices de los investigadores de nivel II y III del SNI.

La Figura 5 muestra la distribución de índices h de los astrónomos del SNI de nivel II y III, construida con la base de datos de dominio público *Astrophysics Data System*, mantenida por el Centro Harvard-Smithsonian de Astrofísica (EEUU). Puesto que la base de datos no contiene las citas emitidas en revistas de ciencias afines, sólo de las de revistas de astronomía, se toma como muestra de estudio a aquellos SNI registrados en la disciplina de Astronomía y Astrofísica, únicamente. Por comparación se muestran distribuciones suavizadas, para mejorar su visualización, de los índices h de los investigadores titulares de departamentos de astronomía de 6 prestigiosos centros internacionales: el Instituto Astrofísico de Canarias (IAC, España), la Univ. de Oxford y de Edimburgo (Reino Unido), el Instituto Tecnológico de California (Caltech) y las Univ. de Arizona en Tucson y de Texas en Austin (EEUU). En todos los casos se excluyen investigadores contratados temporalmente, postdocs e investigadores visitantes o ya retirados. Se observa que el promedio de índices del conjunto de investigadores nacionales de nivel II y III, $\langle h \rangle = 18.1$, es similar al de los investigadores españoles. La distribución de índices es también comparable, con una larga cola generada por aquellos que han obtenido el más alto reconocimiento internacional ($h \geq 20$, que se suele corresponder a un número total de citas que supera el millar). Se puede deducir, por lo tanto, que el conjunto de astrónomos del SNI con niveles II y III tienen indicadores de consolidación y reconocimiento similares a los de sus homólogos españoles adscritos a la institución de más renombre en su país. La comunidad española, como la mexicana, tiene una tradición relativamente corta en astronomía moderna, de alrededor de 40 años. La española, sin embargo, ha contado con el beneficio de una inversión continua en infraestructura punta desde los años 70, especialmente gracias a la participación de socios europeos atraídos por la excepcional calidad óptica del cielo canario, que les ha reportado una cuota de utilización nacional.

La comparación de la distribución mexicana con la de instituciones que se encuentran sistemáticamente entre los mejores centros de investigación astronómica en el Reino Unido y EEUU también ofrece perspectivas interesantes. El promedio de los índices de los SNI III $\langle h \rangle = 28.8$ es comparable al máximo de la distribución de índices de investigadores en estas instituciones británicas y estadounidenses. La mayor parte del intervalo de índices cubierto por los SNI II y III se contempla en estas distribuciones. Se debe recordar que estos centros no solo se benefician de una tradicional inversión nacional para el desarrollo de nuevas tecnologías aplicadas a infraestructura astronómica, sino que, en muchos casos, ellos mismos son copartícipes de saltos tecnológicos y del diseño de los nuevos nichos de explotación científica abiertos. Centros como Caltech, además, invierten en infraestructura para uso preferencial o exclusivo de su institución, como fue el caso de los primeros años de explotación de los telescopios ópticos de 10m Keck. Tanto el Reino Unido como EEUU cuentan con una larga tradición científica y una inversión en investigación básica y en desarrollo de nueva infraestructura punta que, sólo para astronomía, con entre 7 y 10 dólares anuales per cápita a principios de la década⁽¹⁶⁾, supera por mucho el presupuesto nacional mexicano de investigación para todas las ciencias básicas. Así y todo, es patente que el desempeño de la comunidad mexicana es notable en el ámbito internacional, comparable al de países de primer nivel con una tradición joven en astronomía, y que hay un grupo de destacados investigadores nacionales que cuentan con un nivel de reconocimiento extraordinario, comparable al de investigadores británicos y estadounidenses de muy alto nivel, al menos a través de indicadores bibliométricos. Esta apreciación va, sin embargo, en la misma dirección que los reconocimientos internacionales y participación en

organismos de decisión internacional de los que hablábamos anteriormente.

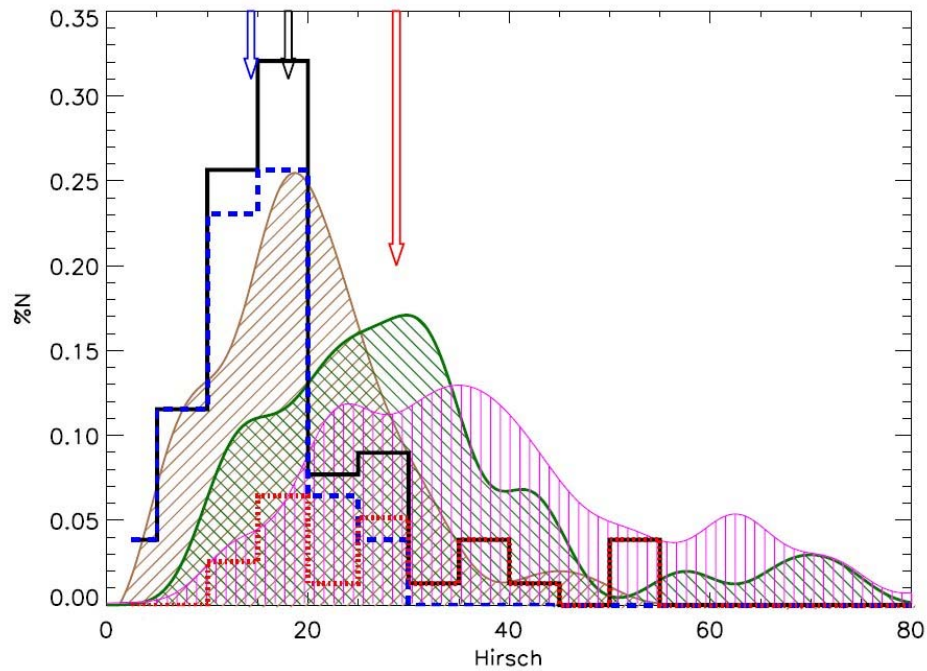


Figura 5: Distribución de índices Hirsch, h , de los SNI II y III registrados en la sección de Astronomía y Astrofísica, en junio de 2008 (conjuntamente, como histograma negro). Los índices de los SNI de nivel II pueden ser identificados en azul y los de los nivel III en rojo. Los índices promedio se señalan con flechas negras, azules y rojas, respectivamente, en la parte superior de la gráfica. Como comparación se ofrece la distribución de índices de plantas de investigadores de entidades prestigiosas en investigación astronómica en otros países: el Instituto Astrofísico de Canarias (en marrón), la combinación de los departamentos de astronomía de las Univ. de Oxford y Edimburgo del Reino Unido (en verde) y los departamentos de astronomía de Caltech, la Univ. de Texas en Austin y la Univ. de Arizona en Tucson, EEUU (en magenta). Las colas de las distribuciones magenta y verde se extienden hasta $h \sim 90$.

Además de producir publicaciones de investigación en revistas especializadas, e impartir clases de licenciatura y postgrado en diversos centros de enseñanza superior, los astrónomos mexicanos desarrollan una fuerte labor divulgadora de la ciencia. La Tabla 2 recoge la publicación de artículos y libros de divulgación en diversos medios impresos. Todos los centros de investigación del país desarrollan también programas de pláticas al público general y a escuelas e institutos de enseñanza media y superior, y la mayor parte de los astrónomos profesionales son colaboradores habituales o son entrevistados frecuentemente por diversos medios de comunicación audiovisuales. En todos los observatorios se reciben varios miles de visitantes cada año, y astrónomos en activo organizan regularmente sesiones de observación para el público en sitios concurridos, como plazas públicas. También hay numerosas colaboraciones con planetarios y asociaciones de astrónomos aficionados locales. La astronomía cuenta con destacados divulgadores dedicados entre sus cuadros, algunos de los cuales también son miembros del SNI, y han recibido los más altos reconocimientos nacionales e internacionales por esta labor.

2.3 Líneas de investigación

Los astrónomos en México realizan tanto trabajo observacional como teórico, cubriendo todo el espectro electromagnético, desde las ondas radio hasta los rayos gamma y cósmicos. Los astrónomos teóricos del país utilizan tanto técnicas analíticas como computacionales. Los intereses científicos de la comunidad son comprensivos, y abarcan las ciencias planetarias y exoplanetarias, la astronomía estelar y solar, los medios difusos (circunestelar, interestelar, interplanetario, intergaláctico), la astrofísica galáctica y extragaláctica, la cosmología y la instrumentación astronómica, principalmente. Las Figuras 6 y 7 representan el número de investigadores trabajando en estas subdisciplinas, y las técnicas empleadas.

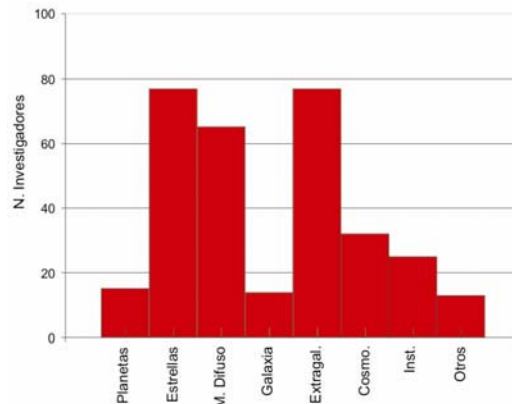


Figura 6. Número de investigadores nacionales que durante el periodo 2003-2007 han publicado resultados en las subdisciplinas de sistemas planetarios, astronomía estelar y solar, medios difusos, astronomía galáctica, extragaláctica, cosmología, instrumentación y otras subdisciplinas, como la arqueoastronomía o la caracterización de sitios astronómicos. Se hace notar que es habitual que un mismo investigador trabaje en varias subdisciplinas.

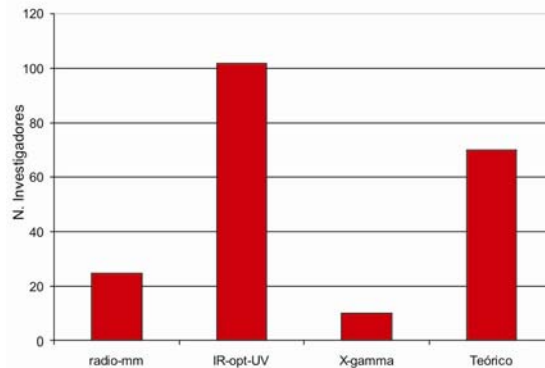


Figura 7. Número de investigadores nacionales que durante el periodo 2003-2007 han publicado principalmente resultados empíricos basados en observaciones en ondas radio a milimétricas, en ondas infrarrojas, ópticas o ultravioletas, en rayos-X, gamma o cósmicos, y resultados teóricos. Se hace notar que un mismo investigador puede contabilizarse en varias de estas categorías.

Las subdisciplinas más practicadas por la comunidad nacional son la astronomía estelar y solar y la astrofísica extragaláctica con un 39% de investigadores. El porcentaje de dedicación a astronomía estelar está en sintonía con los porcentajes de países europeos, que presentaban entre el 22 al 42% de interés por esta área a principios del decenio^(12,*). Astrofísica extragaláctica está por encima del promedio europeo de 17 a 22%. El 8% de dedicación a sistemas planetarios en México es ligeramente inferior al referente europeo de 10-18%. En cuanto a técnicas de investigación, el 36% de los astrónomos nacionales realizan trabajo predominantemente teórico, a compararse con un 34 a 54% europeo. Las longitudes de onda de más utilización por los astrónomos nacionales son las del intervalo infrarrojo cercano-óptico-ultravioleta, con un 52% de usuarios, a compararse con el 33 y 52% en Reino Unido y España. El intervalo radio-mm, en fuerte expansión en todo el mundo, cuenta en México con tan solo un 13% de usuarios, porcentaje incluso inferior al porcentaje europeo del 19 y 21% en España y Reino Unido a principios de la década. Estos países han incrementado el número de usuarios de estas frecuencias en el seno de sus propias comunidades desde entonces, gracias a nueva tecnología disponible en sus telescopios de acceso nacional. Con tan solo 25 investigadores trabajando en estas longitudes de onda en México, esta área observacional debe expandirse fuertemente en el futuro si se quiere aprovechar al máximo la nueva infraestructura disponible para la comunidad nacional.

(*) en las estadísticas europeas un mismo investigador no contabiliza en el total de varias subdisciplinas o técnicas de investigación y, por lo tanto, solamente los porcentajes en los que México aparece por debajo del referente europeo son significativos.

Si atendemos a los investigadores con índices $h \geq 20$ de alto reconocimiento internacional (con aproximadamente más de 1000 citas totales a sus trabajos), encontramos que un 24% emplea observaciones en el intervalo radio-mm, un 43% en el intervalo IR-óptico-UV, un 5% en X-gamma, y un 43% realiza trabajo teórico, tanto analítico como de simulación. Si lo restringimos a los $h \geq 30$ (que se suele corresponder con un total de citas de entre 3000 a más de 10000), encontramos proporciones muy similares, dentro de los errores de ruido blanco. En cuanto a temas de incidencia, las disciplinas que los $h \geq 20$ practican son 10% planetas, 50% estrellas, 57% medios difusos, 29% astronomía galáctica, 52% extragaláctica y 24% cosmología, un 10% construye también instrumentación, pero no como actividad principal. Se debe notar que la mezcla de nuevas generaciones de astrónomos entre los $h \geq 20$ es naturalmente mayor que entre los $h \geq 30$, ya que el índice sólo puede crecer a lo largo de la vida de un investigador, y es incrementalmente difícil superarlo. Por lo tanto, hay investigadores con reconocimientos muy altos en todo el espectro de subdisciplinas practicadas en México.

2.4 Infraestructura operativa

La infraestructura astronómica abierta a propuestas nacionales en estos momentos se concentra en el Observatorio Astronómico Nacional (OAN), con sedes en San Pedro Mártir (Baja California) y Tonantzintla (Puebla), y en el Observatorio Astrofísico Guillermo Haro, sito en Cananea (Sonora). Estos observatorios profesionales cuentan con telescopios ópticos de hasta 2.1m de diámetro. Ambos observatorios fueron construidos con recursos nacionales en la década de los 70, y permitieron la formación de los primeros grupos instrumentistas. Si bien todavía se desarrolla ciencia publicable en revistas internacionales arbitradas con estos telescopios, las áreas del conocimiento en las que los astrónomos pueden hacer un fuerte impacto internacional con esta infraestructura óptico/IR son cada vez más restringidas, lo que demuestra que la infraestructura óptica del país está rezagada y es insuficiente para abastecer las necesidades de la creciente comunidad astronómica nacional y mantenerla en la frontera del conocimiento.

Además del uso de tiempo nacional en estos telescopios ópticos, que hace más de una década ya se consideraban chicos^(7,11), astrónomos nacionales compiten con éxito por la muy restringida fracción de tiempo internacional o por el tiempo abierto de instalaciones internacionales radio a rayos-X, tales como los telescopios espaciales Hubble, Spitzer, Chandra, Newton (EEUU/Europa), los interferómetros *Very Large Array* (VLA, EEUU), y *Sub-Millimeter Array* (SMA, EEUU), el telescopio sub-milimétrico de 15m James C. Maxwell (JCMT, Reino Unido, Canadá y Holanda) o los telescopios ópticos/IR de 8m Gemini y *Very Large Telescope* (varios países), por poner sólo algunos ejemplos.

En la década pasada México finalmente se comprometió a invertir en infraestructura observacional de gran envergadura, que se espera entre en operación próximamente. Se recoge en el Cuadro 3 y en más detalle en la sección sobre infraestructura para la siguiente década.

Cuadro 3: Observatorios de acceso nacional en operación, construcción o ya aprobados, e institución responsable de canalizar el acceso nacional a las instalaciones u organizar los comités de asignación de tiempo. Se incluyen los observatorios estadounidenses en los que la comunidad mexicana puede competir por el tiempo estadounidense.

Principales observatorios	Localización	Intervalo	Gestor del acceso nacional	Situación
OAN 0.84 – 2.1 m	Baja California	óptico a IR	IA-UNAM	En operación
OAN 1m	Puebla	óptico	IA-UNAM	En operación
OA Guillermo Haro 2.1m	Sonora	óptico a IR	INAOE	En operación
e-VLA 27 x 25m	Nuevo México (EEUU)	radio	NRAO (EEUU)	En operación / construcción
GTM 50m	Puebla	mm	INAOE	En pruebas de optimización
GTC 10.4m	Isla La Palma (España)	óptico a IR	IA-UNAM / INAOE	En pruebas de optimización
ALMA 64? X 12m	Atacama (Chile)	mm	NRAO (EEUU)	En construcción
HAWC (~ 900 tanques)	Puebla	gamma	INAOE/ UNAM/ otros	Parcialmente financiado

El país cuenta principalmente con dos centros de supercómputo para investigación: uno en las instalaciones de la Dirección General de Servicios de Cómputo Académico (DGSCA) de la UNAM, y otro en el Centro Nacional de Supercómputo (CNS) del Instituto Potosino de Investigación Científica. La DGSCA, cuya incursión en el supercómputo para investigación data de 1991, posee la supercomputadora KanBalam, de 1368 procesadores, 3 TB de memoria RAM, y 160 TB de almacenamiento en disco, así como otros equipos con los que colectivamente se suman más de 1500 procesadores. El CNS, inaugurado en 2006, es un nuevo centro que cuenta con tres modernos equipos que suman cerca de 4000 procesadores y 12 TB de almacenamiento en disco. Su equipo principal es un Cluster IBM E-1350, de 2736 procesadores, 696 GB de memoria RAM, y 7 TB de espacio en disco.

Aunque ninguno de estos centros son infraestructura astronómica propiamente dicha, cabe resaltar que México cuenta con un grupo importante de astrofísicos teóricos que realizan modelado de alto nivel en gran infraestructura de cálculo, entre otras, en las supercomputadoras mencionadas. Las áreas que, potencialmente, pueden resultar más beneficiadas por acceso a tiempo de cálculo en estos centros son la formación de estrellas y sistemas planetarios, la hidrodinámica del medio interestelar y circunestelar, la dinámica galáctica y los estudios cosmológicos de formación de galaxias y otras estructuras a gran escala. Astrónomos de la UNAM, donde se concentra la mayoría de los modeladores, y sus colaboradores, utilizan rutinariamente las supercomputadoras del DGSCA para su investigación. Sin embargo, la oferta de tiempo de cálculo no es suficiente para abastecer sus necesidades. El CNS se perfila como una importante alternativa de cómputo de alto rendimiento para los astrónomos nacionales, y se espera que la demanda de cálculos astronómicos se incremente tan pronto se demuestre la efectividad de esta infraestructura para ejecutar programas de usuarios externos al centro.

Además de las instalaciones de cómputo nacionales, algunos grupos de astrofísicos teóricos poseen también sus propias granjas de computadoras que han optimizado para el tipo de cálculos que resuelven, y están financiadas principalmente por Conacyt. Estos modeladores han optado por solucionar problemas de menor escala, aunque no por ello de menor importancia, para no tener que luchar con las largas colas de los centros de supercómputo.

2.5 Formación de recursos humanos de alto nivel

Desde 1989 existe la posibilidad de realizar estudios de postgrado en astronomía en el país. El primero de los programas de postgrado se creó en el IA-UNAM. En la actualidad existen 3 postgrados de astronomía incorporados al Programa Nacional de Posgrados de Calidad de Conacyt: el programa conjunto de los centros IA, CRyA, Instituto de Ciencias Nucleares y Facultad de Ciencias de la UNAM, el del INAOE y el del Dept. de Astronomía de la Univ. de Guanajuato. Sólo los programas de postgrado de la UNAM tiene la máxima calificación de calidad Conacyt, que valora predominantemente el reclutamiento de estudiantes y la eficiencia terminal en tiempos estancos, no necesariamente la calidad de la investigación desarrollada por los estudiantes o su desempeño laboral una vez graduados. Sin embargo, se puede afirmar que estos 3 programas forman estudiantes de muy alta calidad, como se puede percibir por su fuerte protagonismo en artículos de revistas arbitradas nacionales e internacionales, por sus ponencias en congresos nacionales e internacionales, y por el número de contrataciones posteriores en centros de investigación nacionales y extranjeros. Como ejemplo ilustrativo, en el recientemente creado premio a la mejor tesis nacional en astronomía, fallado en la primera mitad de 2008, los ganadores en las categorías de doctorado, maestría y licenciatura fueron graduados de estos 3 programas nacionales. Los finalistas de la mejor tesis doctoral, además, contaban ya con entre 3 y 7 publicaciones arbitradas en revistas de alto impacto, fruto de su trabajo como estudiantes, y todos estaban ya realizando estancias postdoctorales en centros de investigación de prestigio, nacionales e internacionales (Europa, EEUU).

Los grupos de astronomía de la Univ. de Guadalajara y de Sonora forman también estudiantes de astronomía dentro de sus postgrados de física. Por lo tanto, la generación de nuevos cuadros de alto nivel en astronomía ocurre en al menos 6 estados de la República.

La tendencia inicial de que los estudiantes de astronomía salieran del país para formarse, ha sido hoy en día complementada por una generación de estudiantes que se doctora en su propio país. De un promedio de 5 nuevos doctores al año en el anterior quinquenio⁽¹⁷⁾, el promedio actual es 6.6 – véase el Cuadro 4 – es decir, el

número de nuevos doctores formados en el país se ha incrementado en un 28%. Además de los estudiantes registrados en sus centros, investigadores nacionales dirigen las tesis de doctorado, maestría y licenciatura de estudiantes visitantes de otras universidades nacionales e internacionales. Es así que el impacto en formación académica de nuevos científicos rebasa las fronteras de sus propios programas de postgrado, e impacta en la de otros centros.

Si consideramos el censo de 194 astrónomos del país, la tasa de formación de nuevos doctores en México es 0.0330 tesis/investigador/año. Esta tasa es similar a la española a principios del decenio, de 0.0326, y está por debajo de las tasas de Alemania, Francia y Reino Unido, de 0.043 a 0.068 tesis doctorales/investigador/año⁽¹²⁾. La tasa mexicana se ha mantenido aproximadamente constante en los últimos 10 años⁽¹⁷⁾. Esta media está ligada al número de nuevos licenciados interesados en la astronomía, pero también al número de investigadores de alto nivel contratados en el país. Si restringiéramos el término investigador a los miembros del SNI de cualquier nivel (aunque los C no suelen dirigir tesis doctorales), la tasa de formación mexicana sería de 0.0434 tesis/investigador/año, en sintonía con las tasas de países como Alemania.

Cuadro 4: Estudiantes graduados a nivel de doctorado y maestría durante el periodo 2003-2007 en la disciplina de Astronomía y Astrofísica en México. Se incluye el número de tesis dirigidas por personal de cada centro. El número de estudiantes graduados en el país es el total de las columnas correspondientes.

Instituto	Estudiantes graduados doctorado	Estudiantes graduados maestría	Tesis de licenciatura dirigidas
UNAM (*) DF + Baja Cal.	11	34	(sin datos)
CRyA-UNAM(*) Michoacán	5	20	18
INAOE Puebla	16	24	14
U. Guanajuato	0 (**)	3	6

(*) Estos centros operan en un solo programa conjunto de postgrado.

(**) Programa de reciente creación, del que todavía no se ha graduado la primera generación de estudiantes de doctorado.

Los doctores nacionales recientemente graduados tienden a salir al extranjero para realizar estancias de investigación como jóvenes profesionales antes de regresar a enriquecer los centros de investigación, universidades públicas y privadas y la industria. Los institutos de investigación más grandes, de hecho, no contratan nuevos investigadores titulares sin que, al menos, éstos tengan un año de experiencia laboral en el extranjero. En casos, esta experiencia se puede extender a unos 5 años de contratos temporales, lo que se considera una trayectoria típica en Europa o EEUU. Los fondos para realizar contratos postdoctorales son dotaciones de Conacyt y, en muchos casos también, fondos propios de centros receptores extranjeros.

Los investigadores del área, además de dirigir tesis de licenciatura, maestría y doctorado, imparten clases de licenciatura, maestría, doctorado y extensión universitaria en sus propios centros y, también, en otros centros de formación superior. Además, es frecuente que impartan clases en escuelas nacionales e internacionales abiertas a otros estudiantes nacionales y extranjeros. Los centros de investigación del país tienen un fuerte interés en fortalecer los programas de licenciatura y de educación secundaria, mantienen escuelas de verano, son anfitriones de estudiantes de licenciatura e muestran el mundo de la investigación a los futuros cuadros científicos del país y de países de nuestro entorno, sea cual sea la disciplina por la que se decanten en el futuro: el INAOE organiza talleres anuales de formación para profesores de secundaria, talleres de ciencia para encauzar a estudiantes de preparatoria hacia ciencias exactas, apoya a clubes de ciencia de escuelas secundarias, desde el 2007 organiza la “Escuela Centroamericana de Astronomía Observacional” para estudiantes de licenciatura, y en los últimos 5 años ha sido sede de 3 escuelas internacionales avanzadas para estudiantes de licenciatura a doctorado del país y del extranjero; el IA-UNAM organiza todos los años la escuela “Verano en el Observatorio” en Baja California, y el CRyA-UNAM la escuela bianual “Escuela de Verano en Morelia”, ambas dirigidas a estudiantes de licenciatura.

3. La infraestructura astronómica de México para la siguiente década

A finales de los 80 ya era patente que la infraestructura observacional de México estaba muy por debajo de la capacidad y ambición de su comunidad científica por generar conocimiento de vanguardia⁽¹¹⁾. También era evidente que la tarea de construir telescopios de alta calidad con tecnología de frontera sólo podía ser realizada en colaboración con otros países, dada la complejidad de los proyectos y los recursos necesarios. En realidad, las demandas de nueva tecnología para construir la nueva generación de telescopios superan la voluntad de inversión en ciencia de casi todos los países del mundo, por lo que todos los nuevos proyectos de gran infraestructura astronómica son internacionales. Un cambio de mentalidad ha sido, por lo tanto, necesario, primero para confiar en que las barreras culturales y los imperativos legales pueden ser soslayados, y segundo para aceptar que esta infraestructura puede no estar localizada necesariamente en el propio país, y no por ello dejar de cumplir su objetivo de desarrollar y fortalecer la comunidad científica y tecnológica nacional.

Pasamos a resumir la nueva infraestructura ya financiada o aprobada, que en su mayoría se planea entre en el futuro inmediato en plena operación científica y que es de acceso abierto a la comunidad nacional. Además de estos proyectos nacionales, algunos astrónomos mexicanos como individuos o como miembros de una institución tienen acceso a otra colección de telescopios y dispositivos de detección astronómicos, que no son de acceso nacional, sino de membresía, como pueden ser el Experimento Pierre Auger, o el *Atacama Cosmology Telescope*, entre otros.

3.1 El Gran Telescopio Milimétrico (GTM)

El GTM (www.lmtgtm.org) es un proyecto binacional México-EEUU, encabezado por el INAOE en México, y por la Universidad de Massachusetts (UMass) en EEUU. Éste es el mayor proyecto científico realizado en México en cualquier campo del conocimiento, hasta la fecha, con un presupuesto total de 120 millones de dólares, lo que sobrepasa en un orden de magnitud al presupuesto de cualquier otro gran proyecto. La participación de México con más de un 50%, lo convierte además en la principal iniciativa astronómica nacional para la nueva década.

La astronomía milimétrica tenía una muy escasa implantación en México antes de que el GTM fuera aprobado por Conacyt como el primero de sus megaproyectos. Sin embargo, puesto que este régimen de observación es relativamente nuevo en el panorama mundial y está logrando focalizar los esfuerzos de países con fuerte inversión en nueva tecnología científica (EEUU, Europa, Japón), se identificó el gran potencial que tenía para llevar rápidamente a la comunidad nacional a una posición de vanguardia, además de incursionar en un área tecnológica en fuerte expansión internacional.



Figura 8: La antena milimétrica GTM, sita a 4580m sobre el nivel del mar en la cima del Tliltépetl (Volcán Sierra Negra), Pue., México, con el Citlaltépetl (Pico de Orizaba) a la derecha, en febrero 2007 (cortesía de J. Reyes).

El desarrollo y transferencia de nuevas tecnologías fue uno de los requerimientos establecidos por las fuentes financiadoras mexicanas para aprobar el proyecto. En respuesta a este desafío, los cimientos, la alidada de acero y la estructura que soporta la antena las han fabricado empresas mexicanas, de acuerdo a las especificaciones establecidas por la compañía alemana que diseñó la antena. El INAOE ha construido el reflector secundario con tecnología de fibra de carbono, ha ensamblado y medido los paneles de la superficie reflectora primaria y está empezando a desarrollar instrumentación de microondas. El GTM, por lo tanto, ya ha logrado incentivar el desarrollo tecnológico de México en microondas y procurar transferencia de tecnología al país.

El GTM se inauguró formalmente en noviembre de 2006, con detección de señal astronómica a 12GHz. Todavía no se ha realizado recepción en las frecuencias de diseño de la antena, 85—375 GHz (0.85—3mm), ya que el telescopio se encuentra en la etapa de verificación y pruebas de la ingeniería mecánica y óptica, previa a la etapa de verificación y pruebas científicas en las que se puedan realizar observaciones bajo las especificaciones de diseño. Se espera que el telescopio entre en una limitada operación científica en 2008-2009 como un 30-m. Su instrumentación, sin embargo, está ya en plena explotación acoplada a telescopios más chicos, lo que está sirviendo de base de entrenamiento para una población creciente de estudiantes de postgrado interesados en realizar sus tesis en astronomía milimétrica. Astrónomos y estudiantes nacionales han publicado alrededor de una decena de artículos en revistas internacionales arbitradas con esta instrumentación hasta el momento.

La comunidad astronómica mexicana está desarrollando un interés demostrado en esta área observacional de la astronomía. Hoy en día hay astrónomos que realizan investigación basada en ondas milimétricas, por el momento con datos obtenidos con infraestructura extranjera, en todos los grandes centros de astronomía del país, y se está formando un número cada vez más grande de estudiantes de postgrado en esta disciplina, aunque el número de astrónomos usuarios de estas longitudes de onda es todavía muy insuficiente. Como ejemplo, en el INAOE hasta el 2004 se generaron 34 tesis de postgrado en las disciplinas de astronomía, óptica y electrónica dedicadas al desarrollo de la tecnología del GTM, a la planeación de la ciencia que se desarrollará con él, al diseño y construcción de instrumentación en longitudes de onda milimétricas o a la investigación con telescopios milimétricos complementarios a GTM⁽¹⁸⁾. Obviamente, una vez que el GTM entre en operación científica, se espera un crecimiento de nuevos astrónomos y tecnólogos en ondas milimétricas en el país, que revertan su preparación punta en instituciones académicas, educativas, y en la industria del país.

3.2 El *expanded Very Large Array* (e-VLA) y el acceso a la infraestructura radio-mm estadounidense

A partir de los 80 se empezó a establecer en México una pequeña comunidad de interferometristas que usan tiempo abierto de infraestructura internacional, principalmente del VLA del Observatorio Radioastronómico Nacional (NRAO, por sus siglas en inglés) de EEUU. En la actualidad trabajan en México alrededor de una veintena de interferometristas ubicados principalmente en la UNAM, la Univ. de Guanajuato y el INAOE. Estos astrónomos mantienen una alta productividad gracias al acceso a estas instalaciones.

Hace poco más de una década se empezó a planear el siguiente gran interferómetro del NRAO, el Atacama Large Millimeter Array (ALMA), por EEUU, Europa y Japón. El nuevo proyecto está en construcción, y si bien no tiene todavía una política de uso definitivamente especificada, muy probablemente funcionará bajo el modelo europeo y japonés de cuotas, según la aportación de los diferentes países a su construcción, mantenimiento y operación. Esta nueva política supone una potencial amenaza para la comunidad mexicana, al carecer de una fracción de tiempo por aportación, que al menos debe ser de 20 millones de dólares de entrada, y de 2 millones de dólares anuales para operación y mantenimiento.



Figura 9: El interferómetro de ondas centimétricas VLA (en los Llanos de San Agustín, NM, EEUU), en el que ya se encuentran integrados los receptores mexicanos e-VLA.

Las gestiones entre los grupos de usuarios en México y el NRAO encontraron una vía para garantizar el acceso por competencia de los astrónomos mexicanos al tiempo estadounidense del NRAO, incluyendo ALMA, si México contribuía formalmente al proyecto de expansión del VLA: el e-VLA (<http://www.aoc.nrao.edu/evla/>), sito en los Llanos de San Agustín, Nuevo México (EEUU). Este proyecto mejora en un factor 10 la sensibilidad y la capacidad espectral del VLA, además de proporcionar cobertura continua de 330 MHz a 50 GHz. El proyecto de expansión, de 72.3 millones de dólares, está financiado por los países de América del Norte: EEUU 80%, Canadá 17%, y México 3% (2 millones de dólares provenientes de la iniciativa de Campos Nuevos de Conacyt).

Originalmente se proyectó que los recursos mexicanos fueran licitados de forma que una institución del país

podiera competir, y con ello se generara una inversión en desarrollo tecnológico nacional. Sin embargo, ninguna institución mexicana se presentó a la licitación y finalmente el contrato se adjudicó al propio NRAO. El equipo construido con la aportación mexicana, dos antenas y 12 receptores para las bandas de 18.0 a 26.5 GHz y de 40.0 a 50.5 GHz, está instalado desde 2005, y el equipo completo ya se ha utilizado desde ese año en varias decenas de publicaciones arbitradas de astrónomos mexicanos, y en las tesis de estudiantes de licenciatura y postgrado.

Se espera que la expansión e-VLA complete su etapa de mejora de receptores en 2010 y que el instrumento esté funcionando a plena capacidad en 2012. ALMA espera empezar operaciones restringidas en modo de pruebas en 2009-2010, con 14 antenas y 2 receptores.

3.3 El Gran Telescopio Canarias (GTC)

El GTC (www.gtc.iac.es) es un telescopio óptico segmentado de 10.4m de apertura, que se encuentra en etapa de verificación y pruebas en el Observatorio Europeo del Norte, sito en el Roque de los Muchachos de la isla de La Palma, Canarias (España). El GTC es una componente fundamental para mantener al observatorio canario en la vanguardia de la astronomía óptica, que estará todavía dominada en la próxima década por los 10m, y dota a la comunidad mexicana de una ventana al universo óptico lejano y débil, que es inasequible con la infraestructura de telescopios de 2m existente en el país.



Figura 10: Cúpula del 10.4m GTC

La inversión de unos 120 millones de euros está financiada principalmente por el gobierno español y el gobierno autonómico canario. La dirección del GTC buscó desde el principio socios internacionales para este proyecto, y esta búsqueda se materializó en una participación del 5% de México, a través de contribuciones institucionales del IA-UNAM y del INAOE. La Univ. de Florida (EEUU) cuenta con otro 5%.

Las negociaciones entre las direcciones de los institutos mexicanos participantes y el GTC propició oportunidades para desarrollar un papel relevante en la construcción de la instrumentación del nuevo telescopio, aprovechando la experiencia con la que cuenta el país en equipar telescopios más chicos. La comunidad de astrónomos ópticos e IR del país está expectante ante la anunciada primera luz científica del telescopio, y la primera ciencia de riesgo compartido, proyectada para finales del 2008 a principios de 2009.

Los institutos nacionales contribuyentes, además, han anunciado que el tiempo mexicano estará abierto a toda la comunidad nacional a través de concurso de proyectos evaluado por pares, como viene siendo habitual con el resto de los observatorios. Además, por primera vez en la historia de la astronomía nacional, el telescopio tendrá un comité de adjudicación de tiempo de representación nacional, que pueda incluir también integrantes que no estén adscritos a los grandes centros del país.

3.4 El High Altitude Water Cherenkov Experiment (Hawc)

Astrofísicos y físicos de altas energías de diversos centros nacionales han creado una alianza para atraer al proyecto internacional Hawc a México. Hawc se proyecta sea la nueva generación de observatorio panorámico Cherenkov en agua, tras el éxito y conclusión de la misión Milagro, que fue desmantelada en junio de 2008 para que su electrónica y tubos fotomultiplicadores se integren en Hawc. La nueva generación de telescopio, que se estima tendrá una vida útil de unos 10 años, debe colocarse en un sitio a más de 4000m para realizar detección en el régimen de los TeV, y el sitio debe ser suficientemente plano y con disposición de agua como para albergar una serie de tanques en los que se sumerjan los detectores.

De entre los posibles sitios del mundo donde podía instalarse Hawc, el Parque Nacional Pico de Orizaba se destaca por su accesibilidad a tan sólo 4 horas del aeropuerto internacional de la Ciudad de México, principalmente por autopista, y su cercanía a otras instalaciones científicas de primer nivel (GTM), lo que garantiza el acceso a una red de comunicaciones moderna. El consorcio Hawc decidió a mediados de 2007

ubicar el observatorio en México dada la solidez del equipo nacional y las prestaciones que el sitio ofrecía.

Hawc será un telescopio que registrará simultáneamente rayos gamma de altas energías (100GeV a 100TeV) del 12% de la bóveda celeste visible en cada momento. Tras un año de operación habrá trazado un mapa de dos tercios del cielo con una sensibilidad 15 veces superior a la de Milagro, lo que permitirá detectar señal equivalente a 50 mili-Nebulosas del Cangrejo. Esta sensibilidad posibilitará la detección de objetos emisores de rayos gamma hasta ahora desconocidos. Entre los objetivos científicos de Hawc se encuentra un censo de emisores de rayos gamma de la Vía Láctea, y el seguimiento de ráfagas de objetos variables. Se espera que el experimento tenga una especial incidencia en el estudio de restos de supernova, estallidos de rayos gamma, blázares, y la actividad del agujero negro central de nuestra galaxia.

Con un presupuesto conjunto de instalación y operación por 2 años de 7 millones de dólares, Hawc es un atractivo proyecto que capitaliza la participación mexicana a través de la explotación de sus recursos naturales, en este caso la benigna topografía de altura y la accesibilidad del sitio. Los astrónomos y físicos de altas energías mexicanos requieren de una aportación nacional adicional para la instalación de la electrónica y los detectores de Milagro y así participar plenamente en este experimento desde una posición de socios. Si bien la parte internacional del proyecto ya decidió ubicarlo en México, los científicos mexicanos siguen buscando fondos federales y estatales que garanticen una participación equitativa en el proyecto.

3.4 Otras iniciativas

Los proyectos que a continuación se describen son iniciativas que secciones de la comunidad nacional está considerando seriamente, y alrededor de las cuales se está tratando de aglutinar el apoyo de la mayor fracción posible de investigadores nacionales.

3.4.1 Un nuevo telescopio óptico/IR para San Pedro Mártir

El Parque Nacional de San Pedro Mártir (SPM), en Baja California, tiene un área de 3055 hectáreas reservadas y protegidas para la explotación astronómica, y en éstas se sitúa el grueso de la infraestructura del OAN. Posee condiciones extraordinarias para la astronomía óptica, con una calidad de imagen limitada por turbulencia de 0.61" de mediana, el 63% de noches fotométricas y 81% de noches espectroscópicas, y una oscuridad del cielo en noches sin luna $V \approx 21.2$ mag, características que son comparables a las de los mejores observatorios del mundo⁽¹⁹⁾. Esta calidad del cielo es un fuerte atractivo para la comunidad astronómica internacional, que periódicamente sondea la posibilidad de colocar telescopios ópticos grandes en SPM, y una esperanza para la nacional de poder atraer nuevos recursos al área de astronomía observacional óptica e IR, que se ha quedado rezagada debido a la falta de inversión en los últimos 30 años.

Aunque se espera que GTC dé un cierto respiro a este rezago, se debe recordar que la comunidad observacional mexicana es muy numerosa en el régimen óptico/IR (véase la Figura 6), y que el 5% del tiempo de GTC tan solo representa unas 15 noches potencialmente disponibles al año, cuando un proyecto de investigación de una pequeña muestra de objetos débiles requiere de al menos 2-3 noches de observación.

Un grupo de instituciones mexicanas, encabezadas por el IA-UNAM y el INAOE, están buscando definir un proyecto de gran envergadura para SPM, atrayendo capital extranjero, en un modelo que ya se ha probado con éxito en otros países con excelente calidad de cielo, como Chile o España. En una era en la que los telescopios ópticos/IR extremadamente grandes, de más de 30m de diámetro, se están empezando a diseñar, escoger un nicho de explotación en el que telescopios más chicos, pero fuertemente optimizados, puedan lograr un fuerte impacto es un requisito indispensable para lanzar una nueva iniciativa de astronomía óptica/IR. Maximizar las sinergias que se puedan generar de la explotación conjunta con el resto de infraestructura de acceso nacional es otro de los aspectos que se deben de tener en cuenta para lograr el espaldarazo de la comunidad de astrónomos nacionales. Un proyecto para instalar dos telescopios gemelos ópticos/IR complementarios de 6.5m ya estaba maduro en 2006⁽²⁰⁾, pero la iniciativa no llegó a materializarse. La comunidad nacional óptica sigue interesada en un telescopio óptico/IR grande con una fuerte participación mexicana, y se está volviendo a organizar para impulsar un nuevo proyecto de un 6-8m óptico/IR altamente optimizado para SPM.

3.4.2 El *Very Long Baseline Array* (VLBA)

El VLBA está compuesto de 10 antenas repartidas por el continente americano, las Islas Hawai y las Vírgenes. Este proyecto busca socios internacionales. Un apoyo de medio millón de dólares garantizaría la participación mexicana. Entre otros proyectos, se podría elaborar un catálogo de distancias y movimientos propios de regiones de formación estelar, que se utilizaría durante décadas como la referencia más precisa en su género. Radioastrónomos del CRyA son expertos en esta área, aunque claramente el interferómetro puede ser utilizado para otros fines científicos.

3.4.3 El *Square Kilometer Array* (SKA)

El radiotelescopio centimétrico más importante planeado para este siglo, SKA, será un interferómetro de participación internacional, con un área colectora de un kilómetro cuadrado. Su ubicación no está decidida, aunque lo más probable es que se emplace en Australia o Sudáfrica. Uno de los objetivos principales del interferómetro es detectar el colapso de los primeros astros y trazar con gran resolución espacial la evolución de las nubes de hidrógeno hasta nuestros tiempos. Participar en SKA sería muy importante para México, ya que posibilitaría mantener su liderazgo internacional en radioastronomía a largo plazo. Una posible participación nacional está siendo impulsada por el CRyA, para lo que se requiere una inversión de unos 20 millones de dólares distribuidos a lo largo de 10 años. El objetivo inmediato sería contribuir a alguno de los “buscadores de ruta”, telescopios de plato único que localizan los candidatos a seguir con el interferómetro, y que ya se están diseñando en diferentes países, y se pueden construir en México.

3.4.4 El *World Space Observatory* (WSO)

WSO es un proyecto para construir un observatorio espacial ultravioleta. El proyecto satelital lo desarrolla Rusia y China y los instrumentos los hará un consorcio de países europeos. Este observatorio todavía no ha recaudado todos los fondos requeridos, pero ya ha sido apoyado por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) y considera la participación de países que no tienen proyectos espaciales propios. En el caso de México, se está discutiendo la colaboración con Rusia en el instrumento de guiado fino del telescopio. Todavía no existe una fecha definida de lanzamiento.

4 Retos planteados

4.1 Maximización del retorno científico/tecnológico obtenido con la nueva infraestructura

México parte con optimismo hacia el 2010 con un todavía modesto bagaje en infraestructura astronómica, pero con nuevas expectativas abiertas por el 50-m GTM, la pequeña participación en el 10.4-m GTC, el acceso a tiempo estadounidense de e-VLA y ALMA, los centros nacionales de supercómputo, y con la esperanza de que Hawc esté ya instalado y se pueda conseguir el apoyo nacional para otras grandes iniciativas. Una fuerte componente del desarrollo de la astronomía nacional para las próximas décadas girará en torno a la explotación científica de esta infraestructura de gran tamaño, con la que se espera obtener un alto impacto científico. Se debe remarcar la necesidad de que estas instalaciones se mantengan operativas y en la frontera por varias décadas, a través de actualizaciones constantes. El éxito de su explotación y el impacto internacional que se pueda lograr con su uso dependen también de la eficiencia con la que cambios importantes en la política científica de inversión puedan ser identificados e implementados para explotar nichos científicos de oportunidad.

Casi todos los proyectos descritos en la sección 3 tienen instrumentación ya construida o en vías de entrega. Una segunda generación de instrumentación está además siendo planeada en estos momentos para mantenerlos en la vanguardia. Los costos de construcción de los instrumentos de primera generación del GTM o GTC varían entre 1 y 10 millones de dólares, y están ya contemplados en las partidas iniciales de construcción de los telescopios. Toda la instrumentación de primera generación del GTM y una gran parte de la del GTC se está construyendo fuera de México, aunque existe un fuerte interés no sólo por participar mediante la construcción de componentes sino por liderar proyectos integrales de segunda generación.

La consecución de descubrimientos científicos importantes por cualquier infraestructura científica parte de plantear casos científicos de gran relevancia y proponer después la instrumentación científica necesaria para

resolverlos, acoplada a la infraestructura con la que ya se cuenta. Esta nueva instrumentación hay que diseñarla, fabricarla y probarla antes de ser instalada en los telescopios, y los equipos encargados de tales tareas son grupos de investigadores instrumentistas, ingenieros y técnicos altamente capacitados, que forman parte de las academias científicas. Contar con estos cuerpos académicos altamente cualificados y valorados, capaces de liderar instrumentación en infraestructura astronómica de gran envergadura, es la única vía de mantenerla competitiva por décadas, y maximizar el impacto científico que ofrece la explotación de las fronteras técnicas, además de garantizar la independencia científica de la comunidad nacional, que incide en aquellos casos científicos en los que es más competitiva dentro del concierto internacional.

4.1.1 GTC

Hasta la década de los 90 ni en el IA-UNAM ni en el INAOE, los dos institutos que regentan telescopios ópticos de explotación profesional en el país, se contaba con experiencia en desarrollar paquetes completos de instrumentación para telescopios de gran envergadura, mucho menos liderarlos, si bien ambos tenían equipos instrumentistas dedicados a los telescopios nacionales de 2.1m, y en sus talleres se fabrican, tras licitación, componentes para instrumentos de telescopios extranjeros más grandes. Con la entrada de México en el consorcio GTC se abrió la posibilidad de participar en la construcción de su instrumentación científica y obtener contratos para su fabricación. Estos proyectos deben desarrollarse bajo calendarios estrictos, revisiones periódicas de avance y estándares de calidad internacional. Además esta actividad supone actualizar espacios y equipos y establecer un control de la calidad de partes propias y subcontratadas a otros institutos de investigación o empresas del país.

El IA-UNAM decidió explotar esta oportunidad mediante una serie de etapas en progresión de complejidad: participación en OSIRIS, liderado por el IAC de España, y la construcción de la cámara de verificación de calidad óptica del telescopio. Esto le ha llevado a consolidar un equipo instrumentista ahora capaz de liderar uno de los instrumentos del GTC de segunda generación, FRIDA, la cámara infrarroja de óptica adaptativa. La cámara de verificación y los paquetes mexicanos de OSIRIS ya se han entregado, y FRIDA está en construcción en estos momentos.

Éste es un ejemplo de lo que podría convertirse en una línea estratégica de desarrollo astronómico para la comunidad nacional en las próximas décadas: instrumentación astronómica para las grandes infraestructuras de acceso nacional. El nuevo reto a futuro sería liderar un instrumento de gran complejidad y coste en base a un caso científico propio de frontera, y ser el líder de un equipo internacional de instrumentistas que lo diseñe, construya, pruebe y explote, siempre manteniendo la excelencia de la investigación que se pueda desarrollar con el mismo como prioridad.

4.1.1 GTM

El INAOE ha dedicado su mayor esfuerzo en la última década a la construcción y caracterización de la antena del GTM, sin invertir fuertemente en desarrollo instrumental, que por acuerdo entre las partes, quedó adjudicado a los socios estadounidenses para su primera generación. El INAOE ha construido el Laboratorio de Superficies Asféricas para medir los paneles que componen el reflector primario, y se ha logrado una experiencia en metrología de grandes piezas que se está ahora trasladando a la industria. Sin embargo, existe la inquietud de que México debe despegar en instrumentación milimétrica si quiere maximizar su liderazgo en la explotación de este telescopio, y garantizar que ésta sea una infraestructura competitiva a largo plazo, independientemente de consideraciones de colaboración internacional. A tal fin, se han creado también dos laboratorios que están diseñando componentes, y colaborando con los socios de la UMass en las pruebas de caracterización de instrumentos.

La instrumentación en microondas permite desarrollar capacidades tecnológicas cuyas aplicaciones van más allá de la instrumentación astronómica, pero todavía no se ha implementado una política decidida de inversión en esta área, probablemente por los altos costes necesarios. Sin embargo, el INAOE está atrayendo a una población de estudiantes, provenientes principalmente de ingenierías, interesados en desarrollar nueva instrumentación para el GTM o telescopios afines.

4.1.2 Control participativo en los órganos de decisión

La infraestructura observacional y computacional de acceso nacional tiene planeados órganos de gobierno independientes que controlen y optimicen su funcionamiento. Es usual en los países líderes del sector que científicos de gran prestigio, en activo, usuarios habituales de ésta u otra infraestructura similar, sean los que conformen estos órganos de gobierno y dicten las políticas sobre explotación y actualización de la infraestructura. Esto garantiza que las decisiones que estos órganos tomen estén guiadas por la búsqueda de la excelencia académica, y que se consiga el máximo retorno científico. Los órganos de gobierno de las infraestructuras de gran envergadura deben tomar decisiones delicadas e informadas sobre su futuro, tales como la división del tiempo dedicado a grandes o pequeños proyectos, la política de instrumentación de segunda generación a financiar o las oportunidades de ligarla a otra infraestructura complementaria, también a nivel internacional. Además, son los responsables de controlar que se haga ciencia de importancia, y de aprobar o desaprobar políticas diseñadas por sus directores, y de nombrar o revocar a los mismos. Órganos de gobierno altamente especializados en cada área de competencia, con gran prestigio académico, y con una responsabilidad directamente vinculada a la comunidad nacional a los que sirven, no son una tradición en México. Sin embargo, garantizar que los mejores científicos en activo de México sean parte de la toma de decisiones, que la membresía sea rotatoria, públicamente conocida por toda la comunidad, y que ésta se sienta libre de contactar a los órganos de gobierno para expresar ideas sobre el desarrollo y futuro de la infraestructura nacional es probablemente el mayor reto al que México se enfrenta en esta nueva década, de cara a la explotación de su infraestructura nacional.

Además, estos órganos de gobierno y las propias infraestructuras deben considerar que una fracción creciente de la comunidad nacional no está localizada en los dos institutos mayoritarios que han marcado la política de desarrollo de la astronomía en México en la última década. Astrónomos de centros más chicos, que hayan alcanzado un reconocimiento internacional importante, también deben incorporarse a estas estructuras de decisión.

Los comités de asignación de tiempo y los comités de usuarios, que reporten directamente a directores y juntas de gobierno de la infraestructura, también deben de ser definidos urgentemente en nuestra comunidad.

4.2 Vertebración del capital humano

Los mecanismos de reconocimiento de la carrera investigadora en ciencias básicas están bien establecidos en México. La creación del SNI y del sistema de estímulos económicos de los grandes centros de investigación incentivan de forma efectiva la productividad de los astrónomos dedicados a generar conocimiento básico, y según se mostró en la sección 2.2, estos productos de investigación son de impacto internacional. La era que abren los nuevos observatorios de acceso nacional hace necesario que nos planteemos cómo pasar de un nivel de reconocimiento internacional representativo de países con una corta tradición astronómica, a la de países de larga tradición, y aumentar así el nivel de competencia promedio nacional.

Si la estrategia a plantear es ligarla a las nuevas ventanas abiertas por saltos tecnológicos, como ocurre en el Reino Unido o EEUU, para lo que se requiere de una fuerte inversión, también es necesario replantear cuál es la situación de los instrumentistas dentro de los cuerpos académicos de astrónomos. Es habitual encontrar que el grueso del colectivo de instrumentistas dedicados, no necesariamente aquellos que además de construir los instrumentos, los explotan, no encuentran vías de progreso efectivo en sus carreras profesionales. Su actividad, en contraste con la de los astrónomos clásicos, no se refleja en un gran número de publicaciones arbitradas. Habitualmente, un instrumento de gran envergadura tarda unos 10 años entre plantearlo y producirlo, y como mucho genera una publicación arbitrada firmada por todo el equipo instrumentista. Entre medias, el proyecto produce un sinfín de documentos y reportes técnicos que reflejan el progreso alcanzado, pero de forma tangible, el instrumento tarda un periodo mucho más grande que los periodos estándar de evaluación en materializarse, probarse, y finalmente, ser explotado por una comunidad astronómica más amplia que el equipo inicial que lo creó.

El SNI tiene la sección VII de ingeniería en la que se ubican algunos de los instrumentistas dedicados de más prestigio de México. El SNI, por lo tanto, en principio puede dar cabida a este colectivo y acomodar los largos tiempos de gestación de instrumentación astronómica. Sin embargo, es habitual encontrar reticencia entre los

propios instrumentistas a entrar en la sección de ingeniería. Es también habitual encontrar que sólo aquellos que lideran los instrumentos o patentes logran la entrada en esta sección, y no los jóvenes recientemente doctorados, o los ingenieros y técnicos académicos que tienen la responsabilidad de diseñar y producir paquetes concretos en estos grandes proyectos. Estos grupos, realmente, sólo generan patentes de forma ocasional⁽¹³⁾, ya que el producto no es comercial ni comercializable, y en el ámbito académico en el que se mueven reina el mismo espíritu altruista por el avance del conocimiento que en el resto de la comunidad astronómica. La falta de patentes puede provocar que el progreso en la sección VII del SNI para los instrumentistas astronómicos no sea óptima. De hecho, muchos de los que entran en esta sección pronto la abandonan para trasladarse a la sección I de ciencias físico-matemáticas, en la que encuentran criterios de permanencia y promoción más universalmente conocidos y reconocidos en las academias de astronomía, si bien alejados de su actividad principal, y combinan allí una carrera híbrida entre las ciencias básicas y la ingeniería astronómica, dividiendo su tiempo entre una y otra. La especialidad de Instrumentación Científica de la sección VII del SNI quizá podría pasar a ser una subdisciplina dentro de esta sección, y con ello elaborar una lista de criterios de permanencia y promoción que puedan acomodar mejor a estos cuerpos académicos.

Además del SNI, las instituciones de investigación no han diseñado todavía un mecanismo de control de la actividad de los instrumentistas que busque la excelencia también en esta disciplina, que los incentive y los recompense, especialmente desde sus primeros años. Reestructurar los métodos de evaluación de los grupos de instrumentación dedicados a desarrollo tecnológico para explotación astronómica es todavía una tarea pendiente en los centros de investigación del país que ya han mostrado interés en embarcarse en desarrollo instrumental de gran envergadura. Sin esta reestructuración, es difícil pensar que el país pueda prosperar en esta prometedora rama del conocimiento.

Los investigadores jóvenes recientemente doctorados tienen dificultad para conquistar nuevos espacios en universidades de provincia y mantenerse en el mundo de la investigación de alto nivel. Con una tasa de 6.6 nuevos doctores en astronomía al año, deben abrirse nuevas plazas tanto en universidades de provincia como en los institutos de mayor tamaño, que necesitan mantener un crecimiento, quizás modesto, pero que les garantice un flujo de nuevas generaciones. La política de atracción de doctores a provincia debe también replantearse. Para mantener a estos nuevos valores en la generación del conocimiento de frontera, además de en la transmisión de altos estándares en el sistema educativo, estas universidades sin larga trayectoria astronómica podrían considerar atraer a pequeños grupos de jóvenes doctores simultáneamente y/o a algún investigador más experimentado, para que se mantenga la presión por pares sobre la producción local de conocimiento. Una oferta anual de estancias de investigación, de uno a tres meses, en otros centros nacionales o internacionales, con el fin de reforzar colaboraciones que den lugar a publicaciones, sería beneficiosa. La vinculación de centros pequeños a los postgrados ya abiertos en el país, a través de convenios de cooperación o de membresía, también les reportaría una mejor implantación en la investigación a nivel nacional.

4.3 Vertebración de órganos académicos nacionales de discusión y consejo

La comunidad astronómica nacional podría sobrepasar en la próxima década los 250 miembros y, sin embargo, sigue pobremente estructurada. Por años la política científica en materia de astronomía ha estado marcada, primero por el IA-UNAM, y en la última década y media también en conjunción con el INAOE. Si bien estas dos instituciones concentran en la actualidad el 70% de los investigadores en astronomía de México y han dominado la comunidad en el pasado, es patente por los mapas y tablas de la sección 2.1 que hay un fuerte colectivo en crecimiento en otros centros de investigación y de educación superior. Es en estos centros, además, donde potencialmente hay lugar para una fuerte expansión de la comunidad que, para alcanzar cotas de densidad de investigadores comparables a las de países con una alta competencia en evaluaciones de enseñanza media, como PISA, debería de, al menos, quintuplicarse (véase el recuadro 2.3 del informe PISA⁽¹⁴⁾). Es, por lo tanto, importante, que los nuevos lugares de expansión astronómica empiecen a ser copartícipes de las decisiones sobre el futuro de la astronomía del país.

Una incipiente Sociedad Mexicana de Astronomía profesional se gestó en 2005, pero todavía no ha despegado como órgano de vinculación y de debate nacional. Hasta la fecha sólo cuenta con los miembros fundadores. Ha habido una serie de intentos por revivirla. Los astrónomos localizados en los pequeños y medianos centros y los jóvenes doctores son los más interesados en que esta organización sea un éxito, pero este tipo de organismo de cohesión beneficiaría a la larga a toda la comunidad.

Un tímido intento de la AMC por coordinar un debate sobre políticas estratégicas de desarrollo científico fue recibido tibiamente por la comunidad astronómica nacional en 2007. Claramente falta una tradición en la toma de decisiones colegiadas o consensuadas por un amplio espectro de la comunidad, y también falta experiencia en cómo acometerlas. Sin embargo, hay receptividad a la idea de que comisiones de astrónomos altamente respetados, que cubran el espectro geográfico, generacional y de especialización del país, puedan emitir recomendaciones estratégicas que lleven a un crecimiento ordenado de la astronomía en México en las próximas décadas, y a maximizar la productividad, impacto y calidad del sector.

En una era en la que los recursos económicos dedicados a ciencia escasean, tener una comunidad unida, organizada y concienciada de cuáles son las prioridades de desarrollo y vinculación con la sociedad, es una necesidad. Comunidades tales como la estadounidense o la canadiense realizan este tipo de ejercicios de reflexión periódicamente, y publican los muy influyentes reportes de década. Los astrónomos somos capaces de implementar mecanismos y emitir recomendaciones ilustradas, guiados por la calidad científica. Es probablemente tiempo de que México se embarque en un debate similar.

Un proceso^(21,22) para llegar a recomendaciones consensuadas se ha implementado en varios reportes de década estadounidenses, que afectan a una comunidad de unos 5000 astrónomos. El proceso se inicia con la elección del presidente de la comisión de sondeo, que es un investigador de renombre altamente respetado por un amplio espectro de la comunidad. Éste elige a 15 investigadores de prestigio en activo para integrar la comisión de sondeo. El presidente inicia conversaciones con administradores y políticos para saber en qué aspectos están más interesados y extraer potenciales temas de sondeo. Estas áreas de interés administrativo no son vinculantes, ya que el estudio atiende a la generación de conocimiento de excelencia, pero de estas conversaciones se identifican áreas de oportunidad y debate. La comisión de sondeo elige presidentes de mesas consultivas en tópicos a discutir (por ejemplo educación, infraestructura óptica, radio, altas energías, desarrollo profesional, etc). Los presidentes de mesa y subpresidentes, estos últimos son miembros de la comisión de sondeo, forman mesas de trabajo con la comunidad, que cubran el abanico de disciplinas, distribución geográfica y generacional necesaria para abordar cada tópico. Se involucra a entre 100 y 300 astrónomos en las mesas de trabajo. Las mesas consultivas preparan informes no vinculantes tras una discusión exhaustiva en la que señalan las cuestiones más relevantes para avanzar su campo en la próxima década, y priorizan las áreas de desarrollo. También recogen documentos de la comunidad que pueden ser analizados para emitir sus recomendaciones. La comisión de sondeo integra los informes en una sola lista de recomendaciones y de prioridad, y este documento estratégico se envía a arbitraje (~20 árbitros) y es publicado por la agencia estadounidense de financiación de la ciencia, *National Science Foundation*, o por el *National Research Foundation*. Todo este proceso lleva unos 14 meses.

El modelo canadiense⁽¹⁶⁾ reposa en comisiones similares ya formadas en el seno de la Sociedad Canadiense de Astronomía (CASCA), y e involucra a la comunidad en la elaboración de informes para este debate de estrategias. La comunidad canadiense tiene un tamaño modesto, de unos 400 astrónomos, comparable a la mexicana. Toda la comunidad participa con ideas a través de discusiones abiertas en varios puntos geográficos, y a través de la recogida de documentos de intención. Un comité de sondeo estudia las recomendaciones de los comités de CASCA y atiende a la priorización de las áreas de desarrollo. El resultado del sondeo es publicado por las agencias de financiación de la ciencia canadiense. El proceso también lleva alrededor de un año.

Escalando este tipo de debates de otros países norteamericanos al tamaño de la comunidad nacional, se puede pensar que una comisión de unos 15-20 investigadores nacionales en activo, representativos del espectro nacional, podrían recoger los documentos de intención y propuestas de la comunidad y analizarlos para emitir recomendaciones de implementación priorizada. El cometido de priorizar las intenciones de desarrollo atendiendo a la generación de conocimientos de excelencia es primordial. Sin una priorización, estos ejercicios se convierten en meras listas de deseos irrealizables. Sin poner como objetivo la constante mejora de la calidad del conocimiento generado, se abre la posibilidad de caer en modas pasajeras dictadas por la política o la administración de turno. Sería recomendable tener comisiones sobre, al menos, infraestructuras, educación y divulgación, y progreso de la carrera de investigación. Recomendaciones de orden nacional en estos temas son acuciantes para mantener a la comunidad astronómica en un nivel de competencia internacional, incrementar la densidad de astrónomos en México sin sacrificar la calidad del trabajo de investigación, y para rebasar nuevas cotas de impacto, formación de recursos humanos de alto nivel y vinculación con la sociedad.

4.4 Cambio necesario del entorno de política científica

Los recursos dedicados a ciencia básica son cada vez más escasos en México. Aunque el nivel de ayudas a formación de nuevos cuadros se mantiene, el nivel de financiación de proyectos de investigación es muy pobre: los proyectos de investigación Conacyt individuales o grupales más grandes en astronomía consiguen montos de 0.1 a 0.3 millones de dólares para 3-5 años, con una dotación promedio en el área de ciencias físico-matemáticas de 0.06 millones de dólares/proyecto⁽⁹⁾. La astronomía generada en México es competitiva a nivel internacional, pero peligra si los recursos que se dedican a la generación de conocimiento no se mantienen de manera decidida. No sólo hacen falta salarios, también hace falta inversión en la generación de conocimiento a través de una más generosa financiación de proyectos de investigación individuales y de grupo, y un mayor número de proyectos financiados, siempre que se demuestre su potencial impacto.

La instrumentación astronómica de gran envergadura, además, no cuenta con una tradicional fuente de financiación en México. Los montos más generosos adjudicados a proyectos de ciencias físico-matemáticas o de ingeniería son insuficientes como para poder embarcar a los instrumentistas del país en una nueva generación de tecnología punta aplicada a la astronomía, y para poder liderar instrumentos en los grandes observatorios de acceso nacional para la próxima década. El mantenimiento de los laboratorios de instrumentación es, además, una fuerte carga de gastos para los institutos que deciden desarrollar esta línea de investigación, por la que también tienen que luchar por conseguir recursos a nivel institucional. En conclusión, para poder desarrollar una vía instrumental de primera línea en México, a parte de aprovechar las oportunidades que los socios extranjeros presentan y que la infraestructura de uso nacional demanda, se necesitan convocatorias regulares de proyectos de investigación y tecnología por las que puedan competir grandes grupos de instrumentistas asociados con una fuerte componente nacional de astrónomos que hayan diseñado un caso científico competente y único.

Para tener una efectiva discusión sobre estrategias de crecimiento y mejora a nivel nacional, además, sería recomendable que las instancias de financiación del país hicieran un ejercicio de proyección sobre cuál es el presupuesto que realísticamente las ciencias pueden aspirar a invertir en un crecimiento ordenado y priorizado. Tradicionalmente la inversión en ciencia básica ha sido errática en el país, y los ejercicios de reflexión sobre estrategias de futuro llevan una gran inversión de tiempo y dedicación de sus comunidades. Para que los científicos mexicanos puedan mantener el paso al desarrollo de la ciencia mundial los planes de inversión en ciencia básica deben también tener una sólida planeación.

La búsqueda de la excelencia académica demostrada por resultados, de nuevo, deberá marcar qué proyectos merecen obtener esta financiación.

Agradecimientos:

Este texto ha sido confeccionado en base a una serie de discusiones fomentadas por la AMC en el periodo 2006-2007. Alrededor de 100 astrónomos participaron en diferentes foros de discusión, que se centraron en proponer posibles estrategias de crecimiento. Sería imposible incluir una lista exhaustiva de todos aquellos que han contribuido con sus ideas, textos y comentarios críticos a este capítulo. Se agradece a toda la comunidad nacional su participación y disposición al diálogo. Se agradece muy especialmente a los directores del IA-UNAM, INAOE, CRyA-UNAM y el Dept. de Astronomía de la Univ. de Guanajuato por proporcionar una ingente cantidad de datos sobre la productividad de sus centros, y por poner al servicio de la AMC sus instalaciones para albergar los foros de discusión.

REFERENCIAS

1. Aveni A.F., 2001, "Skywatchers: A Revised and Updated Version of Skywatchers of Ancient Mexico", University of Texas Press, Austin.
2. Rodríguez L.F., 2000, en "Las Ciencias Exactas en México", A. Menchaca (Coord.), Colección Biblioteca Mexicana, Fondo de Cultura Económica, México: "La astronomía en México: El pasado reciente y los retos de futuro".
3. Peimbert M. y Rodríguez L.F., 2008, en la "Enciclopedia de las Ciencias en México", Carlos Herrero (ed.), Universidad Autónoma Metropolitana, México, en prensa: "Astronomía"
4. Ávila N., Galindo Trejo J., Moreno Corral M.A. y Podeva Ricalde A. "Breve historia de la astronomía en México", Universidad Nacional Autónoma de México.
5. Pişmiş P. y Cruz-González G., 1998, "Reminiscences in the life of Paris Pişmiş: a woman astronomer", Universidad Nacional Autónoma de México.
6. Bartolucci, J., 2000, "La modernización de la ciencia en México. El caso de los astrónomos", Universidad Nacional Autónoma de México.
7. Poveda A., 1995, en "Retos y perspectivas de la ciencia en México", Academia Mexicana de Ciencias: "Con los pies en la tierra y la cabeza en el cielo: algunas enseñanzas derivadas del desarrollo de la astronomía en México"
8. "Anuario Estadístico 2004: Población Escolar de Licenciatura y Técnico Superiore en Universidades e Institutos Tecnológicos", Asociación Nacional de Universidades e Institutos de Educación Superior, México.
9. "Informe General del Estado de la Ciencia y la Tecnología", 2007, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México.
10. In-cites, Editorial of ISI, 2003 (www.in-cites.com/research/2003/december_8_2003-1.html): "Science in Mexico, 1998-2002"
11. Peimbert M. y Costero R., 1998, en "Logros y Perspectivas del Instituto de Astronomía", Universidad Nacional Autónoma de México: "Logros y Perspectivas del Instituto de Astronomía"
12. Barcons X. et al, 2002, "Informe sobre el estado de la investigación en Astronomía en España (1999-2001)", Sociedad Española de Astronomía (disponible en sea.am.ub.es).
13. Informe "La Ciencia en la UNAM 2007 a través del Subsistema de la Investigación Científica", 2007, Universidad Nacional Autónoma de México.
14. Informe "PISA 2006 Science Competencies for Tomorrow's World", 2007, Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE, disponible en www.pisa.oecd.org).
15. Hirsch, J.E., 2006, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, Vol.102, No. 46, 16569: "An index to quantify an individual's scientific research output".
16. Informe "The Origins of Structure in the Universe: Canadian Astronomy and Astrophysics in the 21st Century", 1999, National Research Council – Natural Sciences and Engineering Research Council, Canadá (disponible en www.casca.ca).
17. Lizano S., 2003, en "Estado actual y prospectiva de la ciencia en México", Academia Mexicana de Ciencias.
18. Carrasco E., Aretxaga I. e Irving W.M. (eds.), 2006, "El Gran Telescopio Milimétrico: dos países vecinos exploran juntos el cosmos", Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, México.
19. Ávila R., Cruz-González I. y Tapia M., 2003, RevMexAA (Ser. Conf.), 19, 121: "Workshop Summary"
20. Franco J., 2006, en "Reflexiones sobre la ciencia en México", Academia Mexicana de Ciencias: "La astrofísica en México: los retos del presente y las perspectivas de desarrollo"
21. Bahcall, J.N., 1997, en "The Centennial Volume of the American Astronomical Society", David DeVorkin (ed.), American Institute of Physics, USA (arXiv:astro-ph/9704255): "Prioritizing Science: A Story of The Decade Survey for the 1990s".
22. Informe "Astronomy and Astrophysics in the New Millenium", 2001, National Research Council, EEUU (disponible en www.nap.edu).