

DIRECCIÓN ADJUNTA DE CENTROS DE INVESTIGACIÓN

DIRECCIÓN DE COORDINACIÓN SECTORIAL

PROGRAMAS DE INVESTIGACIÓN DE LARGO ALIENTO (PILA)

“NATURALEZA DEL UNIVERSO”



1. Tema

“Naturaleza del Universo”

2. Grupo de Trabajo *(en orden alfabético)*

2.1 Coordinadores

2.1.1 Coordinadores de PILA

Itziar Aretxaga, INAOE, Puebla.

Adolfo Sánchez Valenzuela, CIMAT, Yucatán

2.2.2 Coordinadores de módulos

Itziar Aretxaga, INAOE, Puebla: El Universo que nos rodea (módulo 1)

Raúl Castro Escamilla, CICESE, Baja California: Ciencias de la Tierra (módulo 2)

Eugenio Méndez, CICESE, Baja California: Interacción luz-materia (módulo 3)

José Luis Morán López, IPICYT, San Luis Potosí: Propiedades físicoquímicas de la materia (módulo 4)

Adolfo Sánchez Valenzuela, CIMAT, Yucatán: El lenguaje del Universo (módulo 5)

Esperanza Carrasco, INAOE, Puebla: Tecnologías para la exploración científica (módulo 6)

2.2 Coautores del documento

Itziar Aretxaga, INAOE, Puebla, módulo 1

Vicente Bringas, CIDESI, módulo 6

Alberto Carramiñana, INAOE, Puebla, módulo 1

Esperanza Carrasco, INAOE, Puebla, módulo 6

Edgar Castillo, INAOE, Puebla, módulo 6

Raúl Castro Escamilla, CICESE, Baja California, módulo 2

Miguel Chávez, INAOE, Puebla, modulo 1

Sabino Chávez, INAOE, Puebla, módulo 3

Roger Cudney, CICESE, Baja California, módulo 3

José Antonio de la Peña, CIMAT, Guanajuato, módulo 5

Luis Delgado Argote, CICESE, Baja California, módulo 2

Armando Encinas Oropesa, IPICYT, SLP, módulo 4

Francisco Espinosa, CIMAV, Chihuahua, módulo 4

Daniel Ferrusca, INAOE, Puebla, módulo 6

Horacio Flores Zúñiga, IPICYT, SLP, módulo 4

Luis Edmundo Fuentes Cobas, CIMAV, Chihuahua, módulo 4

Luis Alonso Gallardo Delgado, CICESE, Baja California, módulo 2

Ewa Glowacka, CICESE, Baja California, módulo 2

Xavier Gómez-Mont Ávalos, CIMAT, Guanajuato, módulo 5

Graciela González Farias*, CIMAT, Guanajuato, módulo 5

Fermín Granados, INAOE, Puebla, módulo 6

Arturo Hernández, CIMAT, Guanajuato, módulo 5

Baldemar Ibarra Escamilla, INAOE, Puebla, módulo 3

Renato Iturriaga Acevedo, CIMAT, Guanajuato, módulo 5

Román López Sandoval, IPICYT, SLP, módulo 4

Diana Lucero Alba, CIDESI, Querétaro, módulo 6

Florentino López Urías, IPICYT, SLP, módulo 4

José Luis Marroquín Zaleta, CIMAT, Guanajuato, módulo 5

Arturo Martín Barajas, CICESE, Baja California, módulo 2

José Andrés Matutes Aquino, CIMAV, Chihuahua, módulo 4

Eugenio Méndez, CICESE, Baja California, módulo 3

Bernardo Mendoza, CIO, Guanajuato, módulo 3

José Luis Morán López, IPICYT, SLP, módulo 4

Raúl Mújica, INAOE, Puebla, módulo 1

Roberto Ortega Ruiz, CICESE Unidad La Paz, Baja California Sur, módulo 2

Gonzalo Páez, CIO, Guanajuato, módulo 6

Víctor Pérez Abreu Carrión, CIMAT, Guanajuato, módulo 5

Jimmy Petean Humen, CIMAT, Guanajuato, módulo 5

Gabriel Ramos Ortiz, CIO, Guanajuato, módulo 3

Raúl Rangel, CICESE, Baja California, módulo 3

Mariano Rivera Meraz, CIMAT, Guanajuato, módulo 5

Israel Rocha, CICESE, Baja California, módulo 6

Mónica Rodríguez, INAOE, Puebla, módulo 1
Vicente Rodríguez González, IPICYT, SLP, módulo 4
José Luis Rodríguez López, IPICYT, SLP, módulo 4
José Romo Jones, CICESE, Baja California, módulo 2
Elder de la Rosa, CIO, Guanajuato, módulo 3
Haret C. Rosu Barbus, IPICYT, SLP, módulo 4
David Sánchez de la Llave, INAOE, Puebla, módulo 3
José Luis Sánchez Llamazares, IPICYT, SLP, módulo 4
Adolfo Sánchez Valenzuela, CIMAT-Mérida, Yucatán, módulo 5
Guillermo Tenorio Tagle, INAOE, Puebla, módulo 1
Elena Terlevich, INAOE, Puebla, módulo 1
Roberto Terlevich, INAOE, Puebla, módulo 1/6
Cauhtémoc Turrent Thompson, CICESE, Baja California, módulo 2
Bodo Weber, CICESE, Baja California, módulo 2
Luis Zavala Sansón, CICESE, Baja California, módulo 2

3. Antecedentes

La naturaleza del Universo ha sido tema de investigación en los centros del sistema CONACYT desde su creación. El grupo de trabajo de este plan surgió de una reunión convocada por el propio CONACYT en noviembre de 2014 a la que fue invitada Itziar Aretxaga, una de las coordinadoras del programa, y en la que se presentó la posibilidad de crear un programa de investigación de largo aliento (PILA) sobre "Naturaleza del Universo" que vertebrara las competencias de los centros CONACYT en las disciplinas de astronomía y cosmología, física, química, matemáticas y ciencias de la Tierra para avanzar el estado del conocimiento en estas materias de forma coordinada, maximizando la colaboración entre centros

Como parte sustantiva de la comunidad nacional, los centros CONACYT han contribuido a la abundante literatura sobre el progreso y planeación de estas ramas del conocimiento en el país, por ejemplo en los libros editados por la Academia Mexicana de Ciencias (AMC) "*Science in Mexico 2008: Present State and Future Perspectives*", Ed. J.P. Lacleste (2008), o por el propio CONACYT, AMC y Consejo Consultivo de Ciencias (CCC) "Hacia dónde va la ciencia en México: Astronomía y Astrofísica" (2014), "Hacia dónde va la ciencia en México: Oceanografía" (2015), "Hacia dónde va la ciencia en México: Óptica" (2015), "Materia Condensada" de J. L. Morán-López y R. Barrera, "Perspectivas de la Biología y la Física, Segunda Parte", Eds. L. Estrada y J. Flores (1989), "Física del Estado Sólido, Diagnóstico de la Física en México", Ed. M. López de Haro (1998), "Algunos problemas de la educación en matemáticas en México" de J.A. de la Peña (2002) y "Reflexiones sobre el curso de la matemática en México a 45 años de la formación de la Academia Mexicana de Ciencias" de A. Sánchez Valenzuela (2006). Además cabe mencionar congresos clave como el de ruptura de la litósfera organizado en 2006 por CICESE, Univ. de Oregón e Instituto Oceanográfico Woods Hole, auspiciado por el programa *Margins* de la *National Science Foundation* (NSF), la fundación *Research Station for Mathematical Innovation and Discovery* (BIRS) (2003, Canadá) dedicada a albergar congresos, escuelas y talleres internacionales en los que puedan difundirse el estado del arte de la ciencia matemática en todas sus disciplinas y áreas de especialidad, bajo un vigoroso esquema de financiamiento por parte de los gobiernos de Canadá, Estados Unidos y, más recientemente, también de México, o el Programa de Astrofísica Avanzada Guillermo Haro que desde 1996 celebra congresos y talleres de trabajo internacionales sobre astrofísica en Puebla. Este plan se nutre de las reflexiones planteadas en estos textos y eventos internacionales.

Los centros CONACYT participantes en el PILA han tenido una incipiente pero todavía muy escasa colaboración entre ellos de forma institucional, aunque desde luego siempre ha habido colaboraciones individuales. Podemos mencionar como ejemplos de colaboraciones interinstitucionales formalizadas la alianza estratégica entre INAOE y CIO para la fabricación de óptica de alta precisión, o la colaboración existente de CIDESI e INAOE en el proyecto de telescopio óptico de 6.5m para San Pedro Mártir, o la creación del Laboratorio Nacional de Geointeligencia Territorial, implementado a iniciativa del CentroGeo y del CIMAT, que viene a hacer sinergia con los Laboratorios Nacionales de Internet del Futuro y de Políticas Públicas del INFOTEC y del CIDE, respectivamente, instituciones todas ellas que comparten sede en la ciudad de Aguascalientes. Estas colaboraciones muestran la fortaleza de los centros CONACYT, que ya les permite participar en consorcios internacionales de investigación. La infraestructura y experiencia de los centros puede aprovecharse aún más si se definen líneas estratégicas conjuntas de desarrollo.

Este documento pretende atender la necesidad de planeación y de mayor coordinación entre los centros. No es un proyecto, desde el punto de vista de que no cuenta con financiación para cumplir metas, sino un plan de desarrollo para que los centros CONACYT demuestren una mayor competencia en investigación, desarrollo tecnológico, formación de recursos humanos y

comunicación pública de la ciencia a largo plazo desde la base de una estructura transversal que facilite la interacción, comunicación y colaboración. Los planes descritos, si bien contemplan un crecimiento realista de los recursos invertidos en estas ciencias, podrán ser realizados en la medida en la que estos recursos se procuren, lo cual implica dinero adjudicado en convocatorias de proyectos de investigación, plazas y nueva infraestructura simple (como oficinas o computadoras) y de envergadura (tal como acceso y creación de laboratorios nacionales e internacionales).

La investigación, docencia y desarrollo de la tecnología y la innovación están a cargo de una muy pequeña fracción de la población en México. Si contamos que de acuerdo con el último censo somos del orden de ciento diez millones de mexicanos y tan sólo aproximadamente veinticinco mil son miembros del Sistema Nacional Investigadores (SNI), entonces somos 2 de cada 10,000 los que estamos profundamente involucrados en la ciencia, la tecnología y la innovación. Este esfuerzo es admirable, sorprendente y magnífico, aunque en realidad necesitamos incrementar la planta investigadora nacional y atender la financiación de estos grupos de investigación.

4. Identificación del impacto en el PECiTI

Ambiente	Con. del universo	Desarrollo sustentable	Desarrollo tecnológico	Energía	Salud	Sociedad
<ul style="list-style-type: none"> Gestión integral del agua, seguridad hídrica y derecho al agua * Mitigación y adaptación al cambio climático* Resiliencia frente a desastres naturales y tecnológicos* Aprovechamiento y protección de ecosistemas y de la biodiversidad* Los océanos y su aprovechamiento Estudios de astronomía y de cosmología Estudios de física, matemáticas, química y sus aplicaciones Estudio de las geociencias y sus aplicaciones Alimentos y su producción* Ciudades y desarrollo urbano* Estudios de política pública y de prospectiva* Aspectos normativos para la consolidación institucional Desarrollo de la biotecnología* Desarrollo de materiales avanzados* Desarrollo de nanomateriales y de nanotecnología* Conectividad informática y desarrollo de las TIC y telecomunicaciones* Manufactura de alta tecnología* Automatización y robótica Desarrollo de la genómica Ingenierías para incrementar el valor agregado en las industrias Consumo sustentable de energía* Desarrollo y aprovechamiento de energías renovables y limpias* Prospección, extracción y aprovechamiento de hidrocarburos Conducta humana y prevención de adicciones* Enfermedades emergentes y de importancia nacional* Medicina preventiva y atención de la salud Desarrollo de la bioingeniería Combate a la pobreza y seguridad alimentaria* Sociedad y economía digital* Migraciones y asentamientos humanos* Prevención de riesgos naturales* Seguridad ciudadana* Comunicación pública de la ciencia Economía del conocimiento Humanidades 						

Competencia

X X X X X X X X X X X X

En negrita marcamos aquellas áreas en las que declaramos ser líderes: Estudios de astronomía y cosmología (módulos 1,6); Estudios de física, matemáticas, química y sus aplicaciones (módulos 3,4,5,6); Estudio de las geociencias y sus aplicaciones (módulos 2,6); y Comunicación pública de la ciencia (módulos 1,2,3,4,5,6).

Adicionalmente tenemos incidencia en: Los océanos y su aprovechamiento por el estudio de hidrología marina (módulo 2); Desarrollo de materiales avanzados (módulos 3,6); Desarrollo de nano-materiales y nanotecnología (módulos 3,4); Conectividad informática y desarrollo de las TICs y telecomunicaciones (módulo 5); Manufactura de alta tecnología (módulo 6); Desarrollo y

aprovechamiento de energías renovables y limpias (módulo 3); Medicina preventiva y atención a la salud (módulos 3,5,6) a través de sistemas de detección no invasivos, por ejemplo imágenes milimétricas, procesamiento de imágenes, interferogramas, análisis infrarrojo de tejidos biológicos, detección de señales de muy baja intensidad en tejidos, etc.

Alcances

1. El Universo que nos rodea: astronomía y astrofísica (fundamental, teórica y observacional). Procesos físicos, químicos en el Cosmos. Fuentes de radiación, su naturaleza y evolución: el Sol, sistema solar, estrellas, supernovas, púlsares, hoyos negros, exoplanetas, cúmulos estelares, Vía Láctea, galaxias, quásares, cúmulos de galaxias, fondos de radiación, medios circunestelares, interestelares, intergalácticos. Estructura del Universo en gran escala. Relatividad y gravitación. Cosmología. Materia y energía oscura. Evolución del Universo. Astropartículas. Astronomía óptica, astronomía de posición, telescopios, espectroscopía, fotometría, polarimetría. Radioastronomía, antenas, radiotelescopios, interferometría.

2. Ciencias de la Tierra: atmósfera. Litosfera. Oceanografía. Interacción atmósfera-Tierra-océano. Aplicaciones.

3. Interacción luz-materia: física atómica y molecular. Óptica teórica (óptica física, óptica de superficies, óptica estadística, coherencia, óptica cuántica, óptica no-lineal, etc.). Mecanismos, detectores e instrumentos ópticos. Microscopía óptica. Sistemas de formación de imágenes. Fuentes ópticas (láseres especiales, otras fuentes cuánticas, etc.). Propiedades ópticas de los materiales. Aplicaciones (microscopía, espectroscopía, rayos X, óptica médica, sensores, seguridad, comunicaciones, etc.).

4. Propiedades fisicoquímicas de la materia: propiedades fisicoquímicas de aleaciones (magnéticas, electrónicas, ópticas, etc.). Propiedades fisicoquímicas de sistemas de baja dimensionalidad (ej. superficies, películas delgadas, nanoestructuras, etc). Aplicaciones en grabación de alta densidad, de nanomateriales magnéticos en la medicina, fabricación de materiales magnéticos para la industria automotriz y de aparatos domésticos.

5. Lenguaje del Universo: álgebra. Análisis matemático. Sistemas dinámicos y ecuaciones diferenciales. Geometría y topología. Probabilidad. Estadística. Métodos numéricos y computacionales. Cómputo científico y súper cómputo. Procesamiento de imágenes. Robótica. Inteligencia artificial. Aplicaciones (ej. modelación de sistemas físicos, químicos, biológicos, financieros, etc.).

6. Tecnologías para la exploración científica: estudios de astronomía y de cosmología. Estudios de física, matemáticas, química y aplicaciones. Estudios de geociencias y sus aplicaciones. Desarrollo de materiales avanzados. Desarrollo de nanomateriales y nanotecnología. Manufactura de alta tecnología. Desarrollos biotecnológicos. Conectividad informática y desarrollo de las telecomunicaciones, Automatización y robótica. Instrumentación astronómica terrestre y espacial (óptica, electrónica, mecánica, etc.). Telescopios. Microscopía. Metrología.

5. Estado del conocimiento

Todas las ciencias básicas están relacionadas y deben avanzar simultáneamente. No se puede excluir a ninguna sin que se caiga el edificio del conocimiento. Se reconoce que no hay ciencia aplicada de punta sin un avance sostenido y amplio de la ciencia básica. En este sentido, la ciencia básica es un tractor de desarrollo de la ciencia aplicada, la tecnología y la innovación, confrontando y abriendo fronteras del conocimiento que requieren desarrollos de punta que actúan como

prototipos inexistentes hasta ese momento, llevando al límite de lo posible tecnología que, de otra manera, no existiría. Innumerables comodidades tecnológicas se han generado como derrama de la investigación básica: la red eléctrica, los dispositivos de carga acoplada como precursores de los chips de cámaras fotográficas digitales, o internet, por poner sólo algunos ejemplos bien conocidos. En el momento de su gestación nadie pudo haber podido predecir que los conceptos básicos de los que se generaron revertirían en aplicaciones tan generalizadas para la sociedad. El conocimiento de la naturaleza del Universo necesita simultáneamente de avances en astronomía, física, química, geociencias, matemáticas y tecnología de forma inmediata. La derrama tecnológica y de aplicación civil, sin embargo, no se da en escalas de tiempo inmediatas o de unos pocos años, sino en escalas de décadas, y es por lo tanto una inversión a largo plazo en el bienestar de la sociedad.

La investigación realizada en los centros CONACYT sobre "La Naturaleza del Universo" se ha caracterizado por su calidad, reconocimiento internacional y por el amplio abanico que abarca en sus alcances. Se publica regular y sostenidamente en las más reconocidas revistas internacionales, se cuenta con una amplia red de colaboraciones internacionales, permanentemente se gestionan y procuran recursos para el mejoramiento de la infraestructura y el equipamiento científico, y se mantienen importantes programas de formación de recursos humanos que día a día incrementan sus niveles de reconocimiento internacional.

Ahora bien, un país que aspira a desarrollar ciencia y tecnología que resuelva problemas y que mejore la vida de sus ciudadanos debe invertir de manera prioritaria en el fortalecimiento de sus cuadros de investigación dedicados a las ciencias básicas y en la formación de nuevos científicos, manteniendo además un continuo programa de renovación de su plantilla nacional de investigadores. Si bien es cierto que se han invertido cantidades importantes en el fortalecimiento de la ciencia y la tecnología en el país y una proporción de estos recursos han estado destinados a la ciencia básica, la inversión dista mucho de ser la correspondiente y correlacionada a una economía del tamaño de la mexicana (13ª a nivel mundial y 2ª en América Latina y el Caribe).

Las grandes inversiones en ciencia y tecnología realizadas por los países con las economías más sólidas del mundo han demostrado que los proyectos científicos de largo aliento requieren de financiamientos sostenidos por muchos años y, dependiendo de sus alcances y metas, los primeros resultados pueden tener que esperar varios años antes de verse reflejados en cambios tangibles en el mejoramiento cotidiano de la calidad de vida de la comunidad o de la competitividad económica del país. Lo que es seguro es que con inversiones austeras, los resultados serán igualmente austeros. La inversión realizada en los últimos 15 a 20 años en México en materia de desarrollo científico y tecnológico ha sido suficiente para 'mantener' los cuadros y estados existentes, pero no para avanzarlos ni para generar nuevos horizontes. Las gráficas de "resultados" solamente muestran incrementos lineales de mesurada pendiente, pero desde hace muchos años el país no experimenta incrementos acelerados (gráficas con pendientes continuamente crecientes) en prácticamente ninguno de los rubros trascendentes. Es verdad que ha habido inversiones importantes (por ejemplo en laboratorios nacionales, equipo de gran calado y desarrollo de nueva infraestructura), pero los indicadores fundamentales (como renovación de la planta científica, formación de recursos humanos o membresía en el SNI, por mencionar solamente ejemplos inmediatos) no han mostrado aceleración alguna en su crecimiento para cerrar la enorme brecha que día a día sigue creciendo con respecto a lo que cada vez más países del mundo están haciendo para fortalecer su ciencia básica y su base de desarrollo científico y tecnológico, atacando la problemática de dicho desarrollo desde su raíz. En este punto vale la pena mencionar un ejemplo significativo. Cada vez un número mayor de centros CONACYT muestra con orgullo incrementos importantes en los porcentajes de sus investigadores ubicados en los niveles II y III del SNI; hay números que pueden ir del 40% hasta casi el 70%, lo que los ubica muy por encima de la media nacional. Sin embargo, el crecimiento desproporcionado de estos porcentajes, en muchos casos, puede ser un reflejo del envejecimiento promedio de la planta académica, en cuyo

caso se corre el fuerte riesgo de agotar, en un plazo relativamente corto, algunas de las vetas que hasta el momento han demostrado ser productivas.

En definitiva, cualquier programa de desarrollo científico del país con metas de largo alcance debe comenzar por esperar cambios cualitativos importantes, mismos que solo serán posibles si hay un cambio robusto, sostenido y sustancial en la inversión y destino de los recursos, lo que a su vez requiere que México observe una política destinada a crecer aceleradamente en materia de ciencia y tecnología, poniendo atención en los puntos medulares: crecimiento significativo de la planta académica, mejoramiento significativo en la formación de nuevos cuadros de científicos, mejoramiento y actualización significativa en la inversión para infraestructura y equipamiento a todos los niveles: desde los grandes laboratorios nacionales, hasta los laboratorios de los grupos más jóvenes.

La investigación que se realiza en los centros CONACYT, por otra parte, hasta el momento no ha estado regida por políticas que permitan establecer prioridades, optimizar recursos, generar proyectos de investigación en temas de frontera o de largo alcance con otros centros CONACYT cuya especialidad es complementaria. Este PILA puede ser un primer paso en este sentido.

5.1 Astronomía, astrofísica y cosmología

Breve historia

La astronomía en México es una ciencia milenaria que se practica desde la época mesoamericana, cuando se requería de un calendario preciso para, además de marcar los días y observancia religiosa, poder predecir las estaciones para la plantación y el cultivo. Estos antiguos calendarios, como el maya y el azteca, eran de hecho más precisos que el calendario gregoriano que utilizamos hoy en día y que apareció muchos siglos después; permitieron la predicción de eventos astronómicos como eclipses y posiciones planetarias, fases lunares, y equinoccios y solsticios. La tradición iniciada en las primeras civilizaciones mesoamericanas trascendió hasta los tiempos modernos. La época colonial, en la que se incorporaron los retos intelectuales de países europeos, principalmente España y Francia, tuvo un impacto significativo, dejando paulatinamente las prácticas indígenas y el enorme efecto que la astronomía tenía en la estructura socio-política.

La astronomía moderna en México, entendida como el estudio predictivo e interpretativo de los mecanismos de funcionamiento de los astros y del cosmos mismo, inició en 1942 con la inauguración del Observatorio Astrofísico Nacional de Tonantzintla (OANTon), en la periferia de la ciudad de Puebla. Esta nueva infraestructura contaba con un innovador instrumento, la Cámara Schmidt, que en su tiempo fue uno de los telescopios más grandes del mundo. El uso de esta cámara condujo al descubrimiento de una gran variedad de objetos celestes, entre otros, los denominados objetos protoestelares Haro-Herbig, las estrellas ráfaga, cometas, y las galaxias azules con líneas de emisión. Las mentes visionarias de Luis Enrique Erro, Joaquín Gallo y posteriormente de Guillermo Haro, y de la primera astrónoma con doctorado en el país, Paris Pişmiş, posicionaron la astronomía mexicana en el concierto internacional.

Existen dos hitos importantes que tienen lugar hacia finales de la década de los 60. Gracias a la motivación y promoción de la astronomía, y al apoyo que se brindó a jóvenes estudiantes de física entusiastas de continuar sus estudios en el extranjero, se propició la formación de los ahora principales centros de investigación en este campo: en 1967 se creó el Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México (IA-UNAM), y en 1971 el INAOE, nuevo centro surgido del OANTon.

El INAOE fue el primer centro de investigación establecido fuera de la Ciudad de México, iniciando con ello la descentralización de la investigación. El instituto tuvo un crecimiento lento pero sostenido motivado por la construcción del Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH) en Cananea, Sonora, inaugurado en 1987. Con este propósito, se invitó a personal del IA-UNAM a participar en un posgrado híbrido que permitiría incluir cursos de astronomía en el Programa Nacional de Posgrado en Optoelectrónica (ProNaPOE), que ya operaba en el INAOE. Aunado a esto, a principios de los 90s se fortalece la planta con investigadores jóvenes y destacados, en parte atraídos por el proyecto del Gran Telescopio Milimétrico Alfonso Serrano (GTM) y por el Programa Internacional de Astrofísica Avanzada Guillermo Haro de talleres de trabajo y conferencias anuales.

La UNAM siguió su proceso de descentralización al crear en 1996 la Unidad Morelia del IA-UNAM, a la que se trasladaron 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, ahora Instituto IRyA-UNAM). Otros grupos de astrónomos también se asentaron en provincia en esta época, especialmente en las universidades de Guanajuato, Jalisco y Sonora.

El número de astrónomos nacionales ha crecido a lo largo de la historia a un ritmo lento pero decidido, y desde principios de los años 90 este crecimiento tiene un comportamiento lineal de unos 8 investigadores por año empleados en el país, bien en contratos de tiempo extendido (en general investigadores o profesores de planta) o temporales (contratados por tiempo y obra e investigadores postdoctorales). Parte de este crecimiento involucró la incorporación de doctores extranjeros para integrarse en la comunidad científica nacional y, con ello, aunar fuerzas en la formación de recursos humanos y en la investigación de frontera realizada en el país.

Situación actual

La planta académica de investigadores en la disciplina de astronomía, astrofísica y cosmología en México asciende a algo más de 220 personas según el último censo de 2014. De éstas, 40 se encuentran en el INAOE. La Coordinación de astrofísica del INAOE es en número de investigadores el segundo grupo de investigación en el campo del país, después del IA-UNAM, y el único dentro del sistema de centros CONACYT. Es de remarcar que el 90% de los investigadores son miembros del SNI, y el 42% están en los niveles II y III.

La investigación realizada se ha caracterizado por el amplio abanico que abarca. Prácticamente se abordan todas las áreas de la astrofísica contemporánea, desde estudios de objetos en el sistema solar hasta propiedades del Universo distante. El 90% de los investigadores realizan estudios observacionales, especialmente con infraestructura de gran envergadura bien nacional o internacional. Destaca el uso de los siguientes instrumentos (que se describen en mayor detalle en la sección 6):

- a) Gran Telescopio Milimétrico-Alfonso Serrano (GTM), en ondas milimétricas (0.8-4mm).
- b) Gran Telescopio Canarias (GTC), en ondas ópticas a infrarrojas medias (0.3-20 μ m).
- c) Observatorio *High-Altitude Water Cherenkov* (HAWC), en rayos gamma (cientos de GeV a TeV).
- e) Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH), en ondas ópticas e infrarrojas (0.3-3 μ m).

Además se utiliza regularmente infraestructura internacional por competencia, en colaboración o no con otros investigadores internacionales. Entre otros: *Chandra Observatory, Hubble Space Telescope, Very Large Telescope, Subaru, Gemini, Spitzer, Herschel, James Clerk Maxwell Telescope, Atacama Large Millimeter Array, Jansky Very Large Array.*

El reconocimiento a la labor investigadora, expresada a través de diferentes indicadores, coloca al grupo de astronomía del INAOE entre los 3 mejores del país, a la par con el IA-UNAM y el IRyA-UNAM.

Desde 1993 el INAOE ofrece posgrados en astrofísica e instrumentación astronómica, y estos se enmarcan en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC). Se tiene un buen influjo de estudiantes extranjeros: en la actualidad hay estudiantes de Colombia, España, India, Rusia, y Venezuela, y en el pasado también de Canadá, Cuba y Perú. En buena medida la atracción de estudiantes extranjeros se propicia gracias al programa de estudiantes de verano del INAOE. Los investigadores también supervisan tesis de posgrado en otras instituciones nacionales e internacionales.

Visión y temática actual

Si bien los logros en los últimos años podrían resultar halagadores, se deben continuar las estrategias para la consecución de la principal misión de generar desarrollo científico y tecnológico en el campo de la astronomía, astrofísica y cosmología al mejor nivel internacional.

Más específicamente las metas a mediano plazo son:

- Propiciar la consolidación de líneas fuertes ligadas a los grandes proyectos, especialmente en astrofísica de altas energías, milimétrica, teórica, y computacional.
- Promover líneas de investigación de frontera, especialmente aquellas en las se tiene menos desarrollo.
- Continuar con la formación de cuadros de científicos que apoyen la explotación científica de GTM, HAWC, GTC, y el futuro Telescopio de San Pedro Mártir de 6.5m (TSPM6.5) y que aborden los nuevos retos para que en el futuro se prosiga reconociendo la posición sobresaliente de la astronomía mexicana en la investigación científica internacional.
- A través del desarrollo de nueva instrumentación para infraestructura propia y en otros telescopios, fomentar las actividades interdisciplinarias dentro del INAOE y con otros centros de investigación, en particular aquellos del sistema CONACyT.

Estos objetivos están estrechamente relacionados. Se debe mencionar que se han identificado 6 grandes ramas en las que se deberán concentrar los esfuerzos. Éstas incluyen aquellas que se consideran prioritarias y aquellas en las que se tiene menos experiencia (marcadas con *).

- 1) Cosmología: energía oscura, materia oscura, estructura a gran escala, propiedades globales del Universo.
- 2) Formación y evolución de galaxias, incluyendo hoyos negros supermasivos, núcleos activos (AGNs), brotes de formación estelar, cúmulos estelares en diferentes etapas evolutivas.
- 3) Medios difusos calientes y fríos: galácticos e intergalácticos.
- 4) Formación y evolución estelar: atmósferas estelares, etapas evolutivas tempranas y tardías, astero-sismología*
- 5) Formación y evolución planetaria: discos circunestelares, exoplanetas*, habitabilidad*.
- 6) Astropartículas y relación con leyes fundamentales de la Física*.

Todas estas líneas serán desarrolladas en términos de los grandes proyectos (infraestructuras) en los que México ya participa.

Se ve la necesidad de rellenar áreas de especialización, muy particularmente en aquellas áreas más desprovistas de expertos y más novedosas en el campo (con asteriscos en la lista inicial).

Retos futuros

México tiene una gran tradición astronómica. Existe una miríada de grandes proyectos de investigación y de infraestructura que se encuentran en fase de construcción o en estudios de factibilidad, que en buena medida corroboran las directrices de la investigación para las próximas décadas. El país, en consecuencia, debe explorar las posibilidades de participación en el concierto de los grandes telescopios espaciales y terrestres que han emergido como prioritarios tanto de las principales agencias espaciales internacionales, como de grandes consorcios internacionales. Por mencionar algunos, el *James Webb Space Telescope (JWST)*, *Wide Field Infrared Space Telescope (WFIRST)*, *Euclid*, *Planetary Transits and Oscillations of stars (PLATO)*, *Advanced Telescope for High ENergy Astrophysics (ATHENA)*, *World Space Observatory-Ultraviolet (WSO-UV)*, etc. Es oportuno señalar que ya existen iniciativas para definir misiones de gran envergadura que la división de astrofísica de la NASA llevará a cabo más allá del 2020, entre los que podemos listar: *FIR Surveyor*, *X-Ray Surveyor* y *Habitable Exoplanet Imaging Mission*. En el segmento terrestre existen múltiples proyectos que derivaran en los primeros mega-telescopios de clase 30m, como el *Thirty Meter Telescope (TMT)*, el *Extremely Large Telescope (ELT)* y el *Giant Magellan Telescope (GMT)*.

Evidentemente, por los costos de tales proyectos cercanos a los ~1000M de dólares se vislumbra imposible que México lidere iniciativas de esta naturaleza en el futuro. Aunque esta aseveración pueda parecer derrotista, no por eso están todos los cauces cerrados, si se realiza una selección estratégica de en qué paquetes de trabajo en los que se tiene o se tendrá experiencia se puede incidir desde este momento, y procurar ser parte del importante legado que estos proyectos dejarán.

Posibles derramas a largo plazo del conocimiento generado en este módulo

- En general las derramas tecnológicas de este módulo están asociadas a las del módulo 6, ya que la astronomía plantea sistemas de detección de la radiación muy finos, para poder estudiar astros más y más débiles. Estas derramas de aplicación civil se han dado hasta ahora en detectores ópticos (cámaras de carga acoplada que se encuentran en cámaras digitales o teléfonos móviles), rayos-X, sub-milimétricos (como los utilizados en hospitales y aeropuertos). Todos estos sistemas de detección han estado encabezados por equipos de astrónomos e instrumentistas trabajando en observatorios de primera línea.
- Las técnicas de análisis de los datos registrados con detectores finos, que se utilizan en astronomía han tenido y tienen aplicación a la detección de otras señales electromagnéticas débiles de aplicación social. Es así que a nivel internacional existen equipos de científicos entrenados en detección de astros débiles en los equipos de Física Médica, que tratan de detectar señales tenues de tumores.
- Además, el entrenamiento en leyes físicas y técnicas computacionales empleadas para los estudios teóricos que requieren la simulación del Cosmos o partes del mismo, son internacionalmente reconocidas como excelente entrenamiento para los especialistas en simulaciones del mercado de valores y la economía en general. En Europa y Estados Unidos una buena parte de estos analistas son científicos entrenados en la simulación de la Naturaleza del Universo.

5.2 Ciencias de la Tierra

Breve historia

Las grandes catástrofes inducidas por fenómenos naturales como los terremotos, los tsunamis, los grandes huracanes y las tormentas tropicales tienen un gran impacto en el desarrollo de las ciencias de la Tierra. El sismo del 19 de septiembre de 1985 ($M_s=8.1$) no fue la excepción, ya que provocó que distintas líneas de investigación en ciencias de la Tierra se enfocaran en entender desde diferentes ángulos un fenómeno natural de grandes dimensiones. Este sismo fue un parteaguas en la investigación en diversas ramas de la ciencia y la ingeniería en México. Desde entonces el número de instrumentos y redes de observación geofísica se ha incrementado considerablemente. A la par otros fenómenos como el gran tsunami del 2004 y recientes tormentas tropicales derivadas del cambio climático global nos han forzado a colaborar con diversos grupos interdisciplinarios de investigación y a cambiar los programas de formación de recursos humanos.

La investigación en ciencias de la Tierra dentro de los centros CONACYT se concentra en el estudio de los procesos naturales que ocurren en la litósfera, la hidrósfera y la atmósfera.

a) Litósfera

La litósfera continental es relevante para la sociedad debido a que resguarda importantes recursos naturales como el petróleo y minerales. A pesar de su importancia científica, hay muchos aspectos que a la fecha desconocemos con precisión. Por ejemplo la magnitud y causa de los esfuerzos que provocan la ruptura continental, así como la historia acrecional de los márgenes continentales y su posterior evolución. Globalmente sólo existen dos regiones donde es posible estudiar los procesos relacionados con el fenómeno de ruptura, uno es el Mar Rojo y otro es el Golfo de California (GoC).

En las regiones donde los continentes se rompen también se genera nueva litósfera, la cual se enfría, se engrosa y es desplazada por nuevo material. Eventualmente puede converger en una zona de subducción donde, normalmente, la corteza oceánica se desliza por debajo de otra que puede ser también oceánica o continental. Este proceso de subducción también es de nuestro interés debido a que en la costa occidental de México, a dicho proceso se asocia la actividad volcánica, así como los grandes sismos que afectan a gran parte de la población. La costa del Pacífico de la península de Baja California también experimentó dicho proceso hace tan solo 10 millones de años y ofrece la oportunidad de analizarlo en retrospectiva. La subducción es uno de los tres tipos de límite entre placas y su estudio es particularmente importante porque de fenómenos asociados con la generación de magmas se producen los yacimientos metálicos de origen hidrotermal y, en los campos volcánicos, los campos geotérmicos.

El estudio de los procesos que ocurren en los márgenes tectónicos es llevado a cabo desde plataformas satelitales, aéreas y de exploración en superficie. Estos estudios motivan avances tecnológicos a mediano y largo plazo en diferentes áreas del conocimiento. Por ejemplo es deseable que la cobertura satelital mejore con el tiempo, así como los sistemas de recepción de señales. La exploración también motiva el desarrollo de nuevos y mejores instrumentos de medición y métodos de análisis. Es de creciente interés abordar estas aproximaciones al recolectar e interpretar de manera integral información geológica, geoquímica y geofísica. Esta temática ha encontrado alojamiento en todos los centros que albergan un grupo de geociencias, incluyendo CICESE, IPICYT y CICY, donde es soportada por el trabajo colaborativo de investigadores de universidades nacionales y extranjeras de ciencias de la Tierra. Es importante resaltar que últimamente en México, y desde hace décadas en otros países, se están desarrollando trabajos interdisciplinarios en las investigaciones marinas. Los especialistas en Tierra Sólida analizan el piso oceánico e interpretan la estructura profunda de la corteza y su interface con el manto. Estas investigaciones son costosas y actualmente cuentan con una infraestructura muy limitada, dadas las dimensiones y la importancia de los temas que se abordan.

b) Hidrósfera

Uno de los grandes retos en esta rama de las geociencias es entender la circulación de los océanos a diversas escalas espaciales y temporales, tomando en cuenta su complejidad turbulenta y su relación con la atmósfera. De esta interacción se deriva la gran influencia de los océanos en el clima y en diversos fenómenos hidrometeorológicos.

La oceanografía fisicoquímica juega un papel fundamental en el conocimiento del ambiente marino tanto en zonas costeras como en mar abierto. El conocimiento de la dinámica de las aguas cercanas a las costas, someras por definición, por ejemplo, provee de valiosas herramientas para la toma de decisiones sobre el desarrollo de infraestructura civil y portuaria, mitigación del impacto de fenómenos naturales (tsunamis, marejadas), apoyo a la industria pesquera, petrolera, y hoy en día, generación de energías renovables (energía mareomotriz, por oleaje, etc.)

c) Atmósfera

Las ciencias atmosféricas abarcan una amplia gama de problemas científicos que sobresalen tanto por su complejidad como por su relevancia social. La naturaleza caótica de la atmósfera representa un reto permanente para la comunidad científica y enmarca problemas que van desde la predicción numérica del tiempo hasta el estudio de la variabilidad climática en múltiples escalas espaciales y temporales. La dinámica de fluidos geofísicos incluye el estudio de la física de todos los flujos atmosféricos afectados por la rotación terrestre y por la estratificación del aire, incluyendo las distintas componentes de la circulación general de la atmósfera y las ondas responsables de buena parte de la variabilidad sinóptica que se asocia con el estado del tiempo.

Situación actual

La investigación en ciencias de la Tierra está bien extendida en México, siendo de destacar los institutos de Geología, Geofísica e Ingeniería y el Centro de Geociencias de la UNAM, centros en las universidades del interior de la república, como la Universidad Autónoma de Nuevo León, la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, y otras. En el Gobierno Federal también hay grupos de investigación, como en el Instituto Mexicano del Petróleo, PEMEX, CFE, y en el Servicio Meteorológico Nacional. En los centros CONACYT las ciencias de la Tierra empezaron en el CICESE en 1975 con la creación de los departamentos de Oceanología y de Geofísica y con el monitoreo de sismicidad del Golfo de California y en particular de la región de Cerro Prieto, en colaboración con la CFE.

La red regional RESBAN del CICESE inició operaciones en 1995 con dos estaciones de banda ancha, una en Bahía de los Ángeles, Baja California, y otra en Guaymas, Sonora. En el periodo 2002-2008 se instalaron 17 estaciones adicionales como resultado de un proyecto de colaboración entre la Universidad de Utrecht, el Instituto Tecnológico de California y el CICESE (red NARS-Baja). Actualmente la red cuenta con trece estaciones en operación. Recientemente el Servicio Sismológico Nacional (SSN) del Instituto de Geofísica de la UNAM instaló 5 estaciones adicionales en la región del GoC cuyos datos comparte con RESBAN. La base de datos generada permite obtener localizaciones hipocentrales más precisas, completar el catálogo ya iniciado por la red NARS-Baja y así se podrá realizar un estudio más completo de la sismotectónica de la región del GoC.

Por su parte, los estudios en el margen del Pacífico y Golfo de California requieren cruceros oceanográficos con equipos para colecta de rocas y sedimentos (draga, nucleador, robots) y de adquisición de datos geofísicos (gravimetría, magnetometría, sísmica de reflexión). Las dos plataformas disponibles son el buque oceanográfico El Puma (UNAM) y el buque Alpha Helix de CICESE en los cuales se requieren sistemas de adquisición de batimetría multihaz, gravímetro y magnetómetro y un sistema de adquisición de sísmica multicanal.

Visión y temática actual

a) Litósfera

La formación y evolución del margen continental constituye un tema de investigación en donde convergen diversas disciplinas, métodos geofísicos y estudios geológicos.

Para poder inferir las fuerzas que generan la ruptura continental en el GoC es necesario proponer nuevos modelos geodinámicos e interpretar la relación entre la deformación quebradiza de la corteza superior, la deformación dúctil de la corteza inferior y los procesos dinámicos que ocurren en el manto superior. Para lograr esto se deberán reinterpretar perfiles sísmicos y realizar mediciones de anisotropía de las ondas de cuerpo y de ondas superficiales.

El estudio geoquímico de las rocas magmáticas puede proporcionar restricciones independientes sobre la posible distribución del material del manto y la relativa contribución del material continental fundido previo a la actividad magmática en la superficie. Nuevos estudios de petrología ígnea permitirán alcanzar este objetivo y conocer otros aspectos sobre la evolución de la corteza terrestre.

Datos obtenidos con fuentes sísmicas activas y su modelado proporcionan importante información sobre la estructura de la corteza del GoC y de los márgenes continentales de la península de Baja California y de la región continental. Nuevas estimaciones de la profundidad del Moho entre los transectos ya existentes permitirán entender mejor las diferencias en la zona transtensional de ruptura continental.

Sismos bien localizados pueden ser útiles para relacionar la actividad sísmica con rasgos detallados del límite de placas. La sismicidad en el GoC es el resultado de la interacción entre las placas de Norte América y la del Pacífico. En esta región fallas de transformación con sismicidad alta y centros de dispersión del fondo oceánico donde ocurre actividad magmática continua forman la frontera de estas placas.

Debido a que el margen del Pacífico de México es tectónicamente activo, la investigación se puede dividir en tres regiones principales (1) el Golfo de California, como ejemplo de un sistema de rompimiento continental y apertura oceánica. 2) El margen continental del sur de México (de Nayarit hasta la frontera con Guatemala) como un ejemplo de una zona de subducción que contiene cuencas de antearco y de talud actualmente activas y (3) el margen del Pacífico de Baja California que representa un antiguo margen de subducción, abandonado y actualmente cortado por fallas activas relacionadas a la separación de la península de Baja California del continente.

El margen continental del Pacífico es activo desde la formación de Pangea y desde entonces ha sido afectado por magmatismo relacionado a la subducción en diferentes áreas. Procesos tectónicos particulares tienen consecuencias importantes para la ubicación y la composición química del magmatismo, el metamorfismo y la deformación que afecta la corteza continental y la integridad misma del margen. Entender estos procesos y sus modificaciones a lo largo de tiempo es importante también para poder entender la formación de yacimientos hidrotermales, algunos de ellos los más importantes a nivel mundial, asociados al magmatismo correspondiente.

La mayor parte de la Cordillera de México ha sido parte de márgenes continentales también antes de la formación de Pangea. Descifrar los diferentes eventos ígneos y metamórficos registrados en la Cordillera Mexicana, que en su mayor parte se encuentra cubierta o intrusionada por complejos magmáticos más jóvenes, es uno de los grandes retos, con implicaciones para las reconstrucciones paleogeográficas a nivel regional y mundial.

b) Hidrósfera

La oceanografía física es una disciplina relativamente nueva, basada en los fundamentos de la física clásica, y que a la vez utiliza y desarrolla métodos y modelos matemáticos complejos. Cabe recordar que el océano (y la atmósfera) son fluidos turbulentos, caóticos, no-lineales, y la turbulencia es uno de los problemas de la física contemporánea que permanecen sin resolver. El estudio de los océanos demanda diversas metodologías (observacionales, teóricas, numéricas y experimentales) para su mejor comprensión a nivel básico y de aplicaciones científicas y tecnológicas.

El estudio de la oceanografía física a profundidades mayores a 500 metros es uno de los grandes temas de actualidad y enorme potencial a corto y largo plazo en el panorama internacional. Existe evidencia de que la dinámica de las aguas profundas es mucho más activa de lo que generalmente se creía. La oceanografía de aguas profundas es un tema de interés prioritario, tanto por razones académicas y científicas, como por el interés económico por explotar hidrocarburos que yacen bajo el lecho marino. La paraestatal PEMEX se ha preparado desde hace algunos años para los retos técnicos que esto implica. Parte de sus esfuerzos están ligados con el CICESE a través de contratos para realizar observaciones oceanográficas desde 2007.

Tanto para fines científicos como para diversas actividades económicas (pesquerías, navegación, o incluso turismo) es necesario recabar información oceanográfica en tiempo real. Hoy en día la tendencia es la de crear redes de observaciones mareográficas automatizadas a lo largo de los litorales que permitan, por ejemplo, registrar la altura de un tsunami y su propagación. En México existen varias redes mareográficas (las del CICESE, UNAM, SCT, y Secretaría de Marina) en proceso de ser completamente automatizadas. Otro ejemplo más complejo es el de las boyas meteoceánicas, equipadas con diversos instrumentos que registran una amplia gama de variables oceánicas y atmosféricas. Su costo de manutención es alto, pero la información que proporcionan es invaluable.

Para impulsar el desarrollo de la oceanografía físico-química a niveles competitivos internacionalmente se requiere una visión amplia que contemple aspectos observacionales, teóricos, numéricos y experimentales. Basar el estudio de la oceanografía físico-química en sólo uno o dos de estos rubros conlleva serias limitaciones metodológicas y conceptuales, además de inhibir la formación eficiente de recursos humanos especializados. Las grandes instituciones oceanográficas en el mundo se han preocupado por cultivar su disciplina atendiendo estas directrices desde hace décadas. En México, el CICESE lo ha hecho desde su formación hace 40 años a través del Departamento de Oceanografía Física, y es sin duda una referencia a nivel latinoamericano.

c) Atmósfera

La comprensión de los ciclos biogeoquímicos del carbono, nitrógeno, oxígeno y agua –por nombrar solo algunos de los más importantes– implica el conocimiento de sus respectivas fases atmosféricas, en las que el vulcanismo, la dinámica atmosférica, procesos biológicos de diversa índole, la química de la atmósfera y las actividades antropogénicas confluyen en interacciones complejas que sólo se pueden abordar plenamente a través de la investigación multidisciplinaria.

Los estudios de la química de la atmósfera también comprenden la evaluación de las diversas fuentes de contaminantes urbanos, así como del análisis de las fuentes, la distribución espacial y los sumideros de todas las especies de aerosoles que tienen efectos de primer orden sobre el balance radiativo del planeta y, en consecuencia, también en la modulación del clima a escala global. Las metodologías empleadas para abordar estos temas incluyen el desarrollo teórico, la modelación numérica, la observación directa y remota de variables atmosféricas y la experimentación bajo condiciones controladas de laboratorio.

Para poder entender la dinámica de fenómenos naturales como los ciclones tropicales, que frecuentemente afectan las costas de México y amplias regiones del interior del país, es necesario entender cómo interactúan el océano y la atmósfera. Actualmente hay un grupo de investigadores en el CICESE trabajando con modelos numéricos que permiten entender diversos aspectos de esta interacción y que podrán validarse cuando se cuente con infraestructura de medición.

El Monzón de América del Norte (MAN) es uno de los fenómenos más importantes de la circulación atmosférica de nuestro continente, regulador de ciclos agrícolas, e importante objeto de estudio en esta disciplina. La amplia gama de procesos y escalas espaciales y temporales asociados al MAN representan un reto importante para la modelación numérica de la atmósfera y los pronósticos. En 2004 se llevó a cabo el Experimento del Monzón de América del Norte (NAME, por sus siglas en inglés) por instituciones nacionales y estadounidenses, que consistió en una campaña observacional de la atmósfera de gran escala. Las metas a largo plazo del NAME, entre las que destaca el mejoramiento continuo de la infraestructura observacional de la atmósfera en México, aún son vigentes.

Retos futuros

El quinto informe de evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático de la Organización de las Naciones Unidas, publicado en el año 2013, estableció el estado actual del conocimiento en torno a las causas y los efectos del cambio climático. Los estudios encaminados al entendimiento de las consecuencias del calentamiento global para los fenómenos meteorológicos que determinan el estado del tiempo en México son incipientes y a la fecha se han basado, casi exclusivamente, en resultados obtenidos a partir de modelos globales del clima que tienen resoluciones espaciales (~100 km) insuficientes para analizar efectos locales y regionales. Los escenarios para el clima del siglo XXI calculados con modelos globales de baja resolución pueden ser re-escalados dinámicamente utilizando modelos atmosféricos regionales de alta resolución, y ésta debe continuar siendo una tarea prioritaria para los grupos de investigación correspondientes.

Existen plataformas observacionales en México no ligadas a los centros CONACYT como el Barco de Investigación Pesquera y Oceanográfica (BIPO-INP-SAGARPA), la última plataforma adquirida por el Gobierno Mexicano o el sistema de boyas costeras y oceánicas que están en proceso de adquisición. Es deseable que los investigadores del sistema de centros CONACYT tengan acceso a ésta y otra infraestructura que diferentes entes gubernamentales tienen o están por adquirir. Es por lo tanto prioritario impulsar construir e impulsar el uso de plataformas observacionales estratégicas nacionales de uso común entre diferentes organismos.

Posibles derramas a largo plazo del conocimiento generado en este módulo

- El estudio del origen y características de los magmas tiene aplicaciones útiles en minería ya que este tipo de conocimiento ayuda a la identificación de yacimientos minerales.
- La localización y distribución de cuerpos magmáticos depende de las características de los procesos geológicos y geofísicos que los generan. Estos cuerpos magmáticos son una importante fuente de calor que se manifiesta en los campos geotérmicos. Este conocimiento se puede aplicar para la generación de energía alternativa.
- El estudio de los volcanes y de los procesos que los originan es importante para pronosticar su comportamiento. Este conocimiento tiene aplicación directa en la prevención de desastres.
- El estudio de la corteza tiene aplicaciones directas para la explotación de recursos naturales como el petróleo, recursos hidrológicos subterráneos y recursos minerales en general.

- El estudio de los sismos y de los fenómenos asociados a ellos permite pronosticar los niveles de intensidad del movimiento del terreno cuando estos ocurren. Este conocimiento tiene una aplicación en el diseño de edificios y en la elaboración de códigos de construcción.
- El monitoreo y análisis de la sismicidad permite hacer evaluaciones de riesgo con aplicaciones en la prevención de desastres y en la construcción de vivienda.
- El estudio de la circulación de los océanos genera datos duros y herramientas con las cuales se puede desarrollar infraestructura civil y portuaria adecuada.
- El estudio de las corrientes tiene aplicaciones para la generación de energía mareomotriz y por oleaje.
- El estudio de la atmósfera y las diversas mediciones que se realizan durante el monitoreo de la misma permite hacer predicciones de las condiciones climáticas. Estas tienen aplicaciones desde la industria aeronáutica hasta la agrícola.

5.3 Óptica

Breve Historia

La óptica es una rama de la física que avanza de manera acelerada. En los últimos diez años, por ejemplo, cuatro premios Nobel de física (2005, 2009, 2012 y 2014) y uno de química (2014) han sido otorgados en reconocimiento a investigaciones relacionadas con óptica. Este reconocimiento se otorga, en parte, por el impacto de las técnicas o descubrimientos en nuestra calidad de vida.

Los láseres se empezaron a desarrollar en México a finales de los 60, principalmente en la UNAM, aunque entonces se recrearon desarrollos de otros países. En los 80 destacan la UAM-Iztapalapa, y también CIO y CICESE. En los 90 se da un impulso fuerte a la investigación y desarrollo de láseres y otras fuentes de luz coherente, principalmente en el CIO, el INAOE y el CICESE. En la actualidad se desarrolla investigación de frontera a nivel mundial en esta área. Otras líneas importantes de trabajo actual se empezaron a gestar a partir de los años 80.

En México, la óptica es una de las ramas de la física que más ha crecido en los últimos años. Actores importantes para este crecimiento han sido tres centros CONACYT: INAOE, CIO y CICESE. A pesar de este crecimiento, no estamos en posición de poder competir con países desarrollados, ni con algunos en vías de desarrollo, en lo que respecta a infraestructura para la investigación, ni tampoco en la proporción per cápita de especialistas. La investigación en óptica que se hace en México es buena y competitiva pero, con la planta académica actual, no es posible abarcar todos los campos de esta ciencia y, en algunos temas, estamos francamente atrasados. Es necesario y urgente tomar acciones para disminuir esta brecha con los países desarrollados.

Situación actual

Actualmente, existen grupos de investigación y posgrados consolidados en óptica en el INAOE, el CICESE y el CIO. En estos centros hay alrededor de 120 investigadores que trabajan en temas de ciencia básica, aplicada, e instrumentación. También en las universidades se realizan investigaciones en óptica. Podemos mencionar los grupos de la Universidad Nacional Autónoma de México (en la Facultad de Ciencias, el Instituto de Física, y el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, por ejemplo), de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, de la Universidad Autónoma Metropolitana en Iztapalapa, de la Universidad de Sonora y del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Además de los temas de investigación básica que se discuten en este documento, se realiza también trabajo sobre aspectos aplicados y de ingeniería óptica. Existen, por ejemplo, grupos consolidados que trabajan en diseño óptico, fabricación de elementos ópticos, interferometría y pruebas de sistemas ópticos, metrología óptica,

pruebas no destructivas, fibras ópticas, comunicaciones ópticas, sensores de fibra óptica, óptica integrada y materiales ópticos.

Visión y temática actual

a) Biofotónica y microscopía óptica

El campo de la biofotónica es uno de los que más auge ha tenido a nivel mundial, por la importancia de sus aplicaciones en medicina y en el estudio de sistemas biológicos en general. La terapia fotodinámica, la micro y nanomanipulación óptica en sistemas microfluídicos y técnicas novedosas de microscopía son algunos de los campos de más desarrollo en esta área, pero no son los únicos.

El nivel de control sobre las fuerzas ejercidas por campos de luz con gradientes espaciales sobre cuerpos con tamaños en la escala de micras llevó al concepto de pinzas ópticas, que permiten mover, rotar, seleccionar o incluso cortar células de diferente tipo. Estas se han conjuntado con el desarrollo de la microfluídica, para realizar diferentes operaciones de selección y clasificación de células.

Por otro lado, el uso de láseres continuos y pulsados ha dado origen a técnicas que permiten generar imágenes con súper resolución, es decir resolviendo objetos con dimensiones menores al límite establecido por difracción, tales como STED (*stimulated emission depletion*), STORM (*stochastic optical reconstruction microscopy*) y otras que permiten resolución funcional y química, como SHG (*second harmonic generation*) y CARS (*Coherent anti-Stokes Raman scattering*). El premio Nobel de química de 2014 fue otorgado a Eric Betzig, Stefan W. Hell y William E. Moerner por el desarrollo de la técnica STED y la espectroscopía de moléculas individuales. Estas técnicas, así como la mayoría del trabajo en microscopía biológica están basadas en el uso de fluorescencia y de marcadores fluorescentes. Se trata de temas de investigación de frontera en los que confluyen la química, la biología y la óptica.

Adicionalmente, a medida que entendemos mejor la propagación de la luz en tejidos biológicos, y que mejora la calidad y el desempeño de las fuentes y detectores de luz en las llamadas ventanas biológicas, en las que los tejidos tienen poca absorción, nos acercamos cada vez más a la posibilidad de utilizar métodos ópticos para formar imágenes del cerebro y otras partes del cuerpo humano.

En el CICESE hay un grupo de investigación que ha incursionado en la implementación de técnicas novedosas en microscopía por absorción multifotónica, SHG y CARS; tanto en el CICESE como en el INAOE hay grupos trabajando en el campo de las pinzas ópticas, microfluídica y propiedades ópticas de tejidos. En el CIO hay grupos que desarrollan nuevas moléculas para marcado fluorescente en sistemas de microscopía y nanoestructuras para diagnóstico y terapia (recientemente se puso en marcha un laboratorio de microscopía óptica que incluye microscopía confocal, multifotónica y Raman), y en el INAOE hay también un grupo con experiencia en la producción de haces de luz estructurados, que pueden utilizarse en sistemas de microfluídica.

b) Esparcimiento y óptica estadística

En México esta área inicia probablemente en los años 80 con trabajos sobre la estadística de moteado láser y esparcimiento de luz por superficies. Actualmente, hay investigadores en estos temas en CICESE, CIO e INAOE. Se trabaja principalmente en esparcimiento de luz por superficies y partículas, fenómenos de esparcimiento múltiple, propagación y absorción de luz en medios no homogéneos y tejidos biológicos, coherencia, fotoestadística y ruido en sistemas de detección.

En el contexto internacional, en lo que se refiere a la interacción de la luz con medios no homogéneos, destacan los estudios sobre efectos coherentes en las propiedades de transporte en medios y guías de ondas con desorden, los estudios sobre fluctuaciones extremas y la propagación de luz en medios no isotrópicos. También, debido a las diferencias con los láseres convencionales, los láseres aleatorios son el foco de muchas investigaciones. Otra área de gran actividad involucra los métodos adaptativos para concentrar luz en medios no homogéneos. Con estas técnicas es posible formar imágenes limitadas por difracción a través de medios no homogéneos. En desarrollos subsecuentes, ya se ha intentado medir la matriz de transmisión que caracteriza al medio aleatorio. Con esta información, es posible utilizar un medio aleatorio como una lente y así formar imágenes a través de tejidos biológicos, por ejemplo. Otros desarrollos interesantes son la posibilidad de realizar espectroscopía con el moteado que se obtiene en una fibra multimodo y la posibilidad de realizar microscopía con discriminación en profundidad basado en el moteado láser.

c) Láseres y fuentes novedosas de luz

En el CIO los temas principales de investigación son los láseres de fibra óptica (continuos, de pulsos ultracortos, láseres Raman), de estado sólido (neodimio en diversos medios), láseres con cavidades no convencionales (por ejemplo, con espejos conjugadores de fase), y fuentes de radiación de terahertz, entre otros. En el INAOE los temas principales son láseres de fibra, haces con estructura espacial (haces adifraccionales, con vorticidad, etc.) y solitones espaciales y temporales. Finalmente, en el CICESE los temas principales son la generación y uso de pulsos ultracortos, láseres de fibra, láseres estocásticos, generación del continuo, láseres de estado sólido, fuentes de terahertz, osciladores ópticos paramétricos y fuentes de luz no clásica.

Entre los temas de interés actual destacan los láseres de alta potencia, de pulsos ultracortos, de ancho de banda muy reducido, de ancho de banda muy grande y controlable, sintonizables sobre un rango grande, de luz no clásica (*squeezed states*, *entangled states*), fuentes de luz muy eficientes, direccionales y compactas (LEDs), regiones del espectro electromagnético donde es difícil obtener alta brillantez, por ejemplo terahertz y rayos x, armónicos extremos y los láseres de cascada cuántica (*quantum cascade lasers*). La lista, sin embargo, dista mucho de ser completa.

Además de sus avances en óptica básica, estas fuentes de luz tienen aplicaciones en áreas tan variadas como medicina, telecomunicaciones, procesamiento de materiales y sensores

d) Materiales y metamateriales ópticos

En los 80 el CICESE desarrolló líneas de investigación sobre el crecimiento de cristales para aplicaciones en óptica, la fabricación de vidrio óptico, recubrimientos ópticos y las aplicaciones de cristales birrefringentes. Posteriormente, apoyados por la llegada de investigadores formados en el extranjero, el CICESE y el INAOE desarrollaron fuertes líneas de investigación en óptica no lineal basadas en materiales fotorrefractivos.

Actualmente, en el CIO se realiza investigación sobre cristales fotónicos, materiales orgánicos e inorgánicos y sus aplicaciones (efectos no lineales, emisión de luz, guías de onda, vidrios para fibras ópticas, fotocatalisis) en dispositivos opto-electrónicos y metamateriales ópticos. En el INAOE se trabaja sobre materiales fotorrefractivos, materiales orgánicos no lineales, materiales holográficos, cristales fotónicos y metamateriales, mientras que en el CICESE se trabaja sobre la caracterización de materiales orgánicos no lineales, transformaciones de fase inducidos por pulsos láser en metales y cerámicas, materiales fotorrefractivos, y el diseño y fabricación de cristales para uso en óptica no lineal, como PPLN (niobato de litio periódicamente polarizado) y PPLT (tantalato de litio periódicamente polarizado). Sólo hay un grupo en el INAOE que estudia propiedades ópticas de materiales, aunque existe una fuerte tradición en las universidades del país.

Del panorama de investigación a nivel internacional, merecen especial atención los metamateriales ópticos. En México se realiza una incipiente investigación teórica en el tema, pero por limitaciones en la infraestructura, prácticamente no hay trabajos experimentales. Para ello se requiere equipo de fabricación a nanoescala, mientras que para el trabajo teórico es necesario tener acceso a supercomputadoras.

Las propiedades ópticas de los materiales que existen en la naturaleza cubren solo una estrecha banda del espacio de parámetros. Es posible, sin embargo, crear materiales artificiales para extender el rango de disponibilidad. Los metamateriales son materiales artificiales que consisten de la combinación de dos o más materiales y cuyas propiedades no resultan de la simple combinación de las propiedades de sus constituyentes. Entre los temas de gran actividad de investigación podemos mencionar los materiales con propiedades magnéticas (permeabilidad magnética distinta a la del vacío), los materiales con constante dieléctrica o con índice de refracción cercano a cero, los materiales con índice de refracción negativo y los llamados metamateriales hiperbólicos. Los metamateriales están también íntimamente relacionados con los trabajos recientes sobre la llamada óptica de transformaciones, a través de la cual es posible esconder objetos, o implementar estructuras para la colección de luz.

e) Óptica cuántica

En México, la óptica cuántica inicia en los años 80 en el CIO. Sin embargo el área no se ha desarrollado en el país suficientemente, y la situación es aún más precaria en aspectos experimentales. El CICESE y el INAOE son los centros CONACYT que comienzan ahora una tradición en el área.

En el contexto global, por las posibilidades que ofrece para el desarrollo de nuevas tecnologías, la óptica cuántica es un área de investigación de gran actividad y relevancia. Los sistemas cuánticos, por ejemplo, pueden exhibir enredamientos -correlaciones no clásicas-, lo que imposibilita la descripción independiente de los subsistemas constituyentes. Esta rama del conocimiento ha generado el procesamiento de información cuántica, con aplicaciones en cómputo, comunicación y criptografía, entre otras. La luz no clásica juega un rol primordial en protocolos de telecomunicación y computación hoy en día.

Entre los temas de interés actual podemos mencionar las fuentes de luz no clásicas (estado de Fock, estados comprimidos, fuentes de pares de fotones enlazados, etc.), la teoría de detección de fotones, el desarrollo de detectores de luz a nivel de fotones individuales, la electrodinámica cuántica de cavidades, el enfriamiento de átomos, la computación y criptografía cuánticas y los procesos multifotónicos. Gracias a la disponibilidad de estados cuánticos de luz se han podido validar los principios de la mecánica cuántica.

De los temas arriba mencionados, los más abordados en los centros CONACYT son el desarrollo de fuentes de luz no clásicas (fotones enredados) y la interacción radiación materia: haces láser con iones atrapados, átomos con campos cuantizados, etc. Hasta ahora, la mayor parte del trabajo es teórico. Por otro lado, la incursión en las demás temáticas es urgente si se desea contribuir al desarrollo de nueva física (teórica y experimental) en un área de frontera.

f) Óptica no lineal y procesamiento óptico de materiales

La óptica no lineal y el procesamiento óptico de materiales se empezaron a desarrollar en México en los 80, en la UAM-Iztapalapa y el CIO, mientras que en la UNAM y en el CICESE se crecieron cristales apropiados para la generación de segundo armónico. En los 90 la actividad en el área se incrementó en CICESE, CIO e INAOE, tanto en la parte experimental como en la teórica. La óptica

no lineal constituye ahora una rama muy activa en los centros CONACYT. En la primera década de este siglo se establecen grupos de procesamiento de materiales con láseres de pulsos ultracortos en el CICESE y en el INAOE. Más recientemente, el CIO ha iniciado también proyectos sobre micromaquinado y procesamiento de materiales fotosensibles aplicados en microfluídica y guías de onda usando pulsos ultra-rápidos.

Actualmente los centros desarrollan proyectos sobre óptica no lineal de orden dos y tres en el bulto, solitones espaciales y temporales, óptica no lineal en superficies, efecto fotorrefractivo, cuasi-empatamiento de fases en cristales ferroeléctricos, óptica no lineal en fibras, óptica no lineal en fibras fotónicas, óptica no lineal de vapores atómicos, generación de luz lenta y luz rápida, ecos fotónicos, generación de estados no clásicos de la luz mediante óptica no lineal, moduladores de frentes de onda mediante óptica no lineal, óptica no lineal de nanopartículas, generación de terahertz y espectroscopía no lineal.

En lo que respecta al procesamiento óptico de materiales, se desarrollan proyectos de investigación sobre el uso de láseres para escribir directamente sobre materiales, la ablación de tejido biológico, la oxidación y transformaciones de fase inducidas en películas metálicas, la formación de estructura periódicas en superficie (LIPSS) y la cavitación inducida en líquidos.

La exploración de la respuesta no lineal de los materiales y el procesamiento óptico de materiales, ha motivado el desarrollo de nuevos tipos de láseres, especialmente en el área de láseres de pulsos ultracortos (femto y picosegundos) donde la tendencia es alcanzar energía por pulso en el rango de μJ a mJ a frecuencias de repetición en el orden de MHz. Se trata de campos del conocimiento que son muy recientes en México y en los que hace falta, tanto infraestructura como especialistas.

g) Plasmónica y nanofotónica

La exploración de la interacción de luz con estructuras con escalas mucho menores que la longitud de onda constituye un área nueva de la óptica. En México, las investigaciones sobre el tema son aún incipientes y es urgente incursionar en temas que, además de desarrollar física básica, prometen una gran cantidad de aplicaciones.

A escalas nanométricas, las estrategias usuales para concentrar luz, como espejos y lentes, no funcionan. Los avances recientes en técnicas de fabricación química y de litografía de haz de electrones, aunados a los avances en métodos rigurosos de cálculo electromagnético permiten tener gran control sobre la posición espectral de las resonancias del plasmón localizado de superficie (RPLS). De esta manera, se han instrumentado técnicas termoplasmónicas para el tratamiento selectivo de tumores cancerígenos, así como técnicas para calentar y medir temperatura de sistemas biológicos (células) a escalas micrométricas, por citar un par de ejemplos.

Utilizando técnicas de homogenización, y con base a resonancias selectivas, es posible diseñar materiales con propiedades ópticas artificiales (metamateriales ópticos). Los campos de la plasmónica y la nanofotónica están entonces íntimamente ligados al de metamateriales.

De gran importancia en la nanofotónica son los plasmones polaritones de superficie (PPS), que son ondas viajeras que pueden excitarse en la interfaz entre un dieléctrico y un metal. Asociadas a estas ondas, se desarrolla una nueva y prometedora tecnología que tiene como objetivo explotar las propiedades ópticas de nanoestructuras metálicas para la manipulación activa de la luz a nanoescala. La plasmónica ofrece la posibilidad de miniaturizar circuitos sin perder la capacidad de transmisión de datos de la óptica, por lo que puede constituir un puente entre estas dos tecnologías. Este campo inició a finales de los 90, cuando se mostró que los nanoalambres

metálicos permiten realizar circuitos ópticos mucho más pequeños que las guías de onda dieléctricas y los desarrollos recientes hacen más plausible la implementación de circuitos híbridos.

La nanofotónica es un campo interdisciplinario en el que para la observación de fenómenos y la fabricación de dispositivos confluyen la física y la química, mientras que muchas de las aplicaciones importantes se encuentran en medicina y en biología. En los países desarrollados la nanofotónica está en un estado de hiperactividad. Una muestra de la interdisciplinariedad de estos temas es que tres de las revistas más importantes en nanofotónica (*ACS Photonics*, *ACS Nano* y *NanoLetters*) son publicadas por la *American Chemical Society* (ACS).

Retos futuros

A pesar de que en el país hay grupos de investigación en óptica con reconocimiento internacional, se trata de una ciencia con campos y especialidades muy variadas en la que las cuestiones interdisciplinarias juegan actualmente un papel preponderante. La infraestructura física y humana con que contamos no es suficiente para tener una presencia internacional y un impacto tecnológico importante.

Además de mejorar en estos aspectos, tenemos retos particulares. La infraestructura nacional para nanofabricación es muy pobre. En estas circunstancias no podemos ser competitivos en temas de nanofotónica, que incluyen temas como los metamateriales ópticos y la plasmónica. El establecimiento y consolidación de laboratorios nacionales y regionales de nanofabricación ayudará a mejorar la situación. También es importante incentivar la interacción entre físicos y químicos. La síntesis química de nanopartículas, la funcionalización de superficies y la caracterización de fluoróforos forman parte importante de las actividades en nanofotónica.

Es claro que para tener presencia en algunas áreas se requiere de trabajo interdisciplinario. Para los investigadores formados en las áreas más convencionales de la física, es difícil involucrarse en trabajos que requieren conocimientos de biología o de química. Se trata de un tema complejo que debe abordarse desde varios frentes, promoviendo reuniones interdisciplinarias, incentivando las colaboraciones con convocatorias específicas, creando grupos de investigación mixtos y flexibilizando e introduciendo cambios en los programas de estudio tradicionales.

La interacción con biólogos es importante para el desarrollo de nuevas técnicas e instrumentación para investigación en biología. Los laboratorios nacionales de microscopía avanzada deben tener, además de los equipos comerciales que dan servicio a los usuarios, grupos de desarrollo e instrumentación.

Tres de los centros CONACYT tienen grupos relativamente grandes de óptica, pero existe poca interacción entre ellos. Es necesario remediar esta situación promoviendo la cooperación a través de convocatorias de proyectos conjuntos e intercambio de estudiantes y postdocs.

Posibles derramas a largo plazo del conocimiento generado en este módulo

- No es posible imaginar el desarrollo de la biología y la medicina sin herramientas como la microscopía y la espectroscopía. Además de las aplicaciones médicas clásicas de la biofotónica, continuamente surgen nuevas posibilidades y herramientas ópticas de terapia, cirugía y diagnóstico. Podemos mencionar, por ejemplo, las técnicas de termoplasmónica para tratar tumores, el uso de láseres para operaciones del ojo y el desarrollo de técnicas para medir presión ocular y diagnosticar glaucoma.
- Tradicionalmente, la óptica estadística y de esparcimiento ha encontrado aplicaciones en las áreas de las pruebas no destructivas, el sensado y la metrología. Se ha reportado mucho trabajo relacionado con aplicaciones en las industrias metal-mecánica, de pinturas y

de plásticos. Recientemente, los avances en la comprensión de sistemas más complejos han derivado en desarrollos que tienen aplicaciones en las ciencias biológicas, como en el diagnóstico de tejidos

- El desarrollo de lámparas LED de luz blanca, que tienen una eficiencia muy superior a la de las bombillas tradicionales, tiene un impacto social y comercial importante. A falta de empresas y de una masa crítica de científicos y tecnólogos trabajando en el tema, participamos en esta revolución del mercado de la iluminación como consumidores.
- Los materiales con propiedades ópticas dinámicas configurables constituyen la base de muchas aplicaciones novedosas de la óptica, tales como las lentes de distancia focal variable, la formación de imágenes a través de turbulencia y el enfocamiento a través de medios difusores, por citar algunas que ya son una realidad.
- La óptica cuántica es probablemente el ejemplo más claro de investigación básica en óptica. Utilizando luz es posible explorar situaciones que no tienen explicación con las teorías clásicas y probar los fundamentos mismos de la mecánica cuántica. Se trata, además, de un área en la que ya se han demostrado aplicaciones interesantes en el procesamiento de información, las comunicaciones y el encriptamiento.
- Las aplicaciones de la óptica no lineal son muy amplias. Entre otras cosas, permite el desarrollo de fuentes de luz coherente con longitudes de onda de difícil acceso, como fuentes de radiación infrarrojas y en frecuencias de terahertz. Un ejemplo simple pero muy conocido son los apuntadores láser de luz verde, que utilizan un diodo láser infrarrojo y un cristal no lineal para generar radiación con el segundo armónico de la luz incidente.
- Las resonancias del plasmón localizado de superficie, que ocurren en partículas metálicas de unos cuantos nanómetros, pueden utilizarse para diseñar nanoantenas que permiten concentrar e intensificar la radiación en regiones muy pequeñas y crear también nanofuentes térmicas. Una de las aplicaciones más interesantes en este campo consiste en asociar nanopartículas metálicas a células cancerígenas a través de una funcionalización química, para después, con un tratamiento fototérmico, matar las células cancerígenas por efectos de temperatura.
- El desarrollo de circuitos lógicos basados en el uso de los plasmones polaritones de superficie promete aplicaciones importantes en los campos de las comunicaciones y el procesamiento de información. Es bien sabido que los enlaces de comunicación por fibra óptica tienen una capacidad de transmisión muy superior a los enlaces por cables eléctricos. Sin embargo, mientras en los circuitos eléctricos tiene componentes de unos cuantos nanómetros, los circuitos ópticos para el procesamiento de información están limitados en sus dimensiones inferiores por la longitud de onda (alrededor de un micrómetro). Esto hace que estas dos tecnologías no sean muy compatibles y que sea necesario pasar continuamente de señales eléctricas a ópticas. Con la plasmónica es posible romper con la barrera que imponen los efectos de difracción, conservándose además la capacidad de transmisión de la óptica.

5.4 Física y química de la materia

Breve historia

La conexión entre el desarrollo de la civilización moderna y los materiales se ha expandido enormemente en las últimas décadas; billones de toneladas de materia prima se toman anualmente de la naturaleza para fabricar innumerables productos. El avance tecnológico del que hemos sido testigos tiene su cimiento en el entendimiento de las propiedades fundamentales de la materia y en el dominio de las técnicas de caracterización y de procesamiento.

Por ejemplo, el conocimiento de la relación entre la estructura y las propiedades de los materiales ha dado la base a la selección y desarrollo de otros no existentes. Además el entendimiento de las propiedades electrónicas de materiales ha hecho posible la producción de dispositivos electrónicos y ópticos de tamaños diminutos. Es importante también mencionar que con la investigación de la estructura molecular, se ha podido producir un vasto espectro de polímeros capaces de operar bajo condiciones extremas, incluyendo elevadas temperaturas y uso excesivo. Finalmente, controlando la microestructura ha sido posible obtener nuevas aleaciones extremadamente ligeras y cerámicas superconductoras.

Así, los avances tecnológicos que han dado origen a la nueva forma de vida están cimentados en la investigación básica de las propiedades fisicoquímicas de la materia. Un ejemplo contundente es la comprensión de las propiedades electrónicas de materiales semiconductores y el subsecuente desarrollo del transistor en 1947.

El estudio de las propiedades fisicoquímicas de la materia condensada es una de las de mayor tradición y de las que cuentan con el mayor número de investigadores en nuestro país.

Los primeros estudios se realizaron en el Instituto de Física de la UNAM. Los grupos teóricos iniciales estaban interesados en física del estado sólido y en la termodinámica y mecánica estadística de líquidos. Posteriormente se empezó a desarrollar un grupo en el Departamento de Física del CINVESTAV interesado en el estudio de los materiales semiconductores. Un poco después, con la fundación de la UAM se formó un grupo importante en mecánica.

Solo fue a partir de la década de los 70 que se empezaron a formar grupos en universidades estatales fuera de la Ciudad de México. Los Institutos de Física de la Universidad Autónoma de Puebla y de San Luis Potosí y el Centro de Investigación en Física de la Universidad Autónoma de Sinaloa, son algunos ejemplos.

En los años ochenta se dio un gran auge al estudio de la superficie de los sólidos. En esos años se pudieron desarrollar métodos para producir ultra-alto vacío y sintetizar en manera controlada superficies limpias y bien caracterizadas. La importancia del entendimiento de cómo cambian las propiedades de los sólidos al acercarse a la superficie fue trascendental para estudios de catálisis, el magnetismo en sistemas de baja dimensionalidad (importantes en la grabación magnética), recubrimientos que daban al sólido propiedades especiales, propiedades semiconductoras para la fabricación de celdas solares, etc.

Alrededor de ese tema se consolidaron grupos de investigación tanto teórica como experimental en diferentes dependencias y sedes de la UNAM, el CINVESTAV y la UAM, el Instituto Mexicano del Petróleo, la Universidad Autónoma de Puebla, la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, La Universidad Autónoma de Sonora, la Universidad Autónoma de Sinaloa, la Universidad Autónoma de Nuevo León, entre otras.

A fines de los 80, con el descubrimiento de los superconductores de alta temperatura crítica, se dio un gran impulso a la investigación en esa área. Se fortalecieron los grupos de investigación en magnetismo, cristalografía y física de sólidos a bajas temperaturas. La actividad en este tema se vio disminuida al no tener las aplicaciones espectaculares que se esperaban.

El descubrimiento de los cuasicristales en los años noventa trajo consigo una gran actividad teórica, ya que la cristalografía tradicional excluye la formación de sistemas macroscópicos periódicos de "simetría cinco". Investigadores de la UNAM y de la UASLP, principalmente, hicieron aportaciones teóricas importantes en ese campo.

El siguiente gran impulso al estudio de las propiedades fisicoquímicas de la materia condensada se dio al identificar en 1996 las nuevas formas de carbono; fullerenos, nanotubos, nanoalambres, etc. que dio origen a la nanociencia. Los grupos que se habían formado alrededor de las propiedades de superficies incurrieron inmediatamente en este campo, ya que las técnicas tanto teóricas como experimentales se aplican con algunas modificaciones al estudio de estos sistemas.

Más recientemente, los estudios de las propiedades electrónicas y magnéticas de sistemas de baja dimensionalidad y de tamaños menores a las micras han permitido el avance de sistemas computacionales cada vez más pequeños y eficientes. A la par, las comunicaciones también se han beneficiado de ese tipo de investigación básica.

Solo fue a partir de la fundación del CIMAV a mediados de los 90 y del IPICYT en el 2000, que se empezaron a nuclear grupos de investigación sobre las propiedades fisicoquímicas de la materia condensada en los centros CONACYT.

Situación actual

En la actualidad, una de las comunidades de físicos con un mayor número de investigadores es el de materia condensada; sin embargo, la mayoría de ellos se encuentran laborando en universidades públicas. Se podría estimar un aproximado de que solo un 10 % se encuentran en los centros públicos de investigación.

Los temas de investigación principales son, física de semiconductores, materiales magnéticos, física de fluidos, propiedades de la materia blanda, materiales optoelectrónicos, materiales plasmónicos, materiales superconductores, física de superficies.

En los últimos años, la respuesta a la pregunta de cómo dependen las propiedades de estabilidad y propiedades fisicoquímicas, al ir del átomo o moléculas a sistemas macroscópicos, es un tema de importancia de ciencia básica con implicaciones tecnológicas. Además, con el desarrollo de sistemas computacionales más poderosos, ahora es posible calcular con mayor precisión algunas de las propiedades fisicoquímicas de la materia e intentar modelar sistemas complejos, que no era posible hace algunos años.

De ahí la importancia de tener grupos sólidos en los centros CONACYT que realicen investigación básica, tanto teórica como experimental, de nuevos materiales.

Con el avance de las capacidades de cómputo a nivel internacional y la decisión de las autoridades del Sistema, se fundó el Centro Nacional de Supercómputo en el IPICYT, uno de los primeros laboratorios nacionales. Con el uso de este equipo se han podido hacer investigaciones más complejas y profundas en muchos campos en la física y la química de sistemas que van desde los de tamaño nano hasta los objetos de estudio en astronomía.

Visión y temática actual

En la actualidad se realizan investigaciones teóricas y experimentales de manera independiente, con poca interacción entre los grupos dentro del sistema y en temas escogidos por los propios investigadores; sin merma de su independencia, se debería de implementar uno o múltiples proyectos que involucren a varios investigadores y grupos con fines bien definidos por los participantes.

Actualmente, los temas de mayor actividad a nivel internacional, que están siendo estudiados en el CIMAV y el IPICYT y que seguramente tendrán impacto en los próximos diez años son:

nanoestructuras mono y bimetalicas, grafeno, materiales magnéticos sólidos y de dimensionalidad reducida, y espintrónica.

Retos futuros

Desearíamos que en un futuro próximo se cuenten con grupos consolidados con un impacto internacional no solo a través de sus publicaciones científicas, sino también por las aplicaciones logradas. Es deseable que se establezca un laboratorio nacional en materiales magnéticos.

Es también deseable y factible que se establezcan colaboraciones a través de laboratorios virtuales con investigadores franceses y de otros países líderes del sector.

Posibles derramas a largo plazo del conocimiento generado en este módulo

Las aplicaciones del campo de materiales magnéticos, que se propone reforzar, son muy amplias. Como ejemplo se pueden mencionar

- Incremento en la densidad de grabación magnética. Al encontrarse sistemas con dimensiones reducidas, del orden de los nanómetros, con estabilidad a temperatura ambiente, alta asimetría magnética, y momentos magnéticos grandes, se espera aumentar en varios órdenes de magnitud la densidad de grabación magnética.
- Actualmente se han emprendido proyectos de la aplicación de nanomateriales magnéticos para el combate de células cancerígenas. Las propiedades esenciales de estas partículas son que sean paramagnéticas para que no se aglutinen en el tránsito hasta el lugar donde se encuentra el tumor y que se puedan magnetizar con campos débiles para que al ser excitadas magnéticamente emitan calor para combatir las células enfermas.
- La necesidad de producir imanes permanentes con alta energía es de interés a las industrias automotriz y doméstica. Entre más potentes y de menores dimensiones sean los imanes menor energía se requerirá para su funcionamiento.
- Las aplicaciones de materiales magnéticos de tierras raras es un tema de investigación aplicada en la electrónica moderna; sus propiedades magnéticas son superiores a la de los materiales tradicionales basados en metales de transición.

5.5 Matemáticas y ciencias de la computación

Breve historia

Desde hace años, los países económicamente fuertes se comenzaron a mover con gran velocidad en la dirección de darle altísima prioridad a la concertación de inversiones conjuntas, gubernamentales y privadas, con el propósito de mejorar, muy en particular, la enseñanza de las matemáticas y desarrollar los potenciales talentos jóvenes a fin de conseguir, en un plazo relativamente corto, más y mejores científicos. En los Estados Unidos, por mencionar un ejemplo cercano, la empresa ExxonMobil comprometió más de 100 millones de dólares en respaldo de la Iniciativa Nacional en Matemática y Ciencia del gobierno de ese país (<http://corporate.exxonmobil.com/en/community/math-and-science>).

La razón fundamental es que las matemáticas están en todas partes y detrás de todo lo que vemos, tenemos y hacemos en el día a día. “La matemática está en todas partes” fue el título que se le dio a la sesión especial de conferencias en matemáticas dentro del evento “Ciencia y Humanismo” organizado por la Academia Mexicana de Ciencias en enero de 2012. El propósito de las conferencias fue hacer evidente que, un país que aspira a desarrollar tecnología que resuelva problemas y que mejore la vida de sus ciudadanos debe prestar atención al fortalecimiento de las

ciencias básicas y a la formación de científicos; en particular, a la buena formación de profesionales de la matemática.

La matemática en México ha gozado de gran reconocimiento y prestigio internacional desde que sus primeras generaciones de matemáticos formados en los programas de posgrado de los principales departamentos de matemáticas de Estados Unidos (Princeton y MIT, entre ellos) regresaron al país y comenzaron a desarrollar las primeras escuelas de investigación en topología y álgebra.

Las principales instituciones mexicanas dedicadas a la investigación y formación de recursos humanos de posgrado en matemáticas son, la Facultad de Ciencias, el Instituto de Matemáticas y el Instituto de Investigación en Matemáticas Aplicadas y Sistemas de la UNAM (que datan de 1935, 1942 y 1967, respectivamente), el Departamento de Matemáticas del CINVESTAV-IPN (1961), el Departamento de Matemáticas de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería de la UAM (1974) y el CIMAT (1980).

Según relata “La geometría y su desarrollo en México”, de Ana Irene Ramírez Galarza y Adolfo Sánchez Valenzuela, en nuestro país, la investigación en matemáticas y en física, se inicia en la UNAM. En particular, la investigación en matemáticas comienza propiamente con Alfonso Nápoles Gándara, el primer mexicano que realizara estudios de posgrado en el *Massachusetts Institute of Technology* de 1930 a 1932 gracias a una beca Guggenheim. A su retorno a México, Nápoles Gándara, junto con Sotero Prieto Rodríguez y algunos alumnos de las escuelas de ingeniería y filosofía de la UNAM conducen diversos trabajos de investigación original en matemáticas. De hecho, Nápoles Gándara impartió la primera clase de geometría diferencial en el Departamento de Ciencias de la Facultad de Filosofía y Letras y escribió dos artículos sobre curvas que se deslizan sobre una superficie. La cátedra de geometría diferencial la impartió por más de 30 años. Entre sus primeros alumnos se cuentan Alberto Barajas, Carlos Graef Fernández y Manuel Sandoval Vallarta; y así, cuando el profesor de la Universidad de Harvard George David Birkhoff visita México en 1943 y 1944, ellos están preparados para aprovechar lo que Birkhoff venía a exponer. Por su parte, Sotero Prieto impartía una cátedra sobre historia de las matemáticas y fue de allí que Barajas, Graef y Nápoles Gándara fueran atraídos hacia el estudio de la geometría.

Alberto Barajas fue, en 1942, el primer investigador del Instituto de Matemáticas de la UNAM, aunque la creación del Instituto fue aprobada por el Consejo Universitario desde 1938. Barajas trabajó primero en un tema de geometría sintética: formas intrínsecas de parametrizar las circunferencias de una familia. Después colaboró, junto con Carlos Graef y Manuel Sandoval Vallarta, en una teoría de la gravitación propuesta por Birkhoff que, en la época, competía con la de Einstein y tenía la virtud de que sus ecuaciones eran más sencillas. Los tres obtuvieron resultados importantes.

De esa misma época (1946), datan los trabajos en geometría de Roberto Vázquez García, después consagrado a la topología. Uno de ellos fue realizado en colaboración con Javier Barros Sierra, demostrando una conjetura de Birkhoff: una superficie tiene curvatura gaussiana constante si todos los círculos geodésicos de un radio fijo tienen la misma área. Fue en 1946 también cuando José Adem Chaín hizo una incursión en geometría al determinar la distribución de esfuerzos en una placa homogénea que en cada punto tiene dos direcciones de simetría ortogonales.

De trascendental impacto resultaron las visitas periódicas que desde 1945 hasta 1966 realizó el profesor Solomon Lefschetz del Instituto de Estudios Avanzados de la Universidad de Princeton al Instituto de Matemáticas de la UNAM. Lefschetz era experto en geometría algebraica, ecuaciones diferenciales y topología algebraica, y condujo seminarios en estas disciplinas por donde pasaron Félix Recillas, Emilio Lluís Riera, Guillermo Torres, José Adem, Samuel Gitler, Samuel Barocio, Horst (Elmar) Winkelkemper, Santiago López de Medrano, y Alberto Verjovsky, entre otros. La contribución de Lefschetz al impulso y desarrollo de las matemáticas en México resultó

fundamental pues no sólo expuso, difundió y promovió aquí la investigación en sus áreas de especialidad, sino que también logró becas de posgrado para que estudiantes mexicanos estudiaran en prestigias universidades de EUA, como Princeton, donde se formaron nuestros maestros más legendarios. Con sobrados méritos, Lefschetz recibió el reconocimiento “Orden del águila Azteca” de manos del secretario de relaciones exteriores, el poeta José Gorostiza, en 1964 y en representación del entonces presidente de la República, el Lic. Adolfo López Mateos.

Entre los primeros alumnos mexicanos motivados por Lefschetz para trabajar en geometría algebraica estuvieron F. Recillas y E. Lluís Riera; este último fue el primero en doctorarse en matemáticas en el campus de Ciudad Universitaria en 1954 con un tema sugerido por Lefschetz y desarrollado bajo la supervisión de Pierre Samuel quien a su vez se doctoró en Princeton en 1947 con Oscar Zariski. La tesis de Emilio Lluís se publica en 1955 en la más prestigiosa revista de matemáticas que existe en los tiempos modernos: *Annals of Mathematics*; editada en Princeton y de la cual Lefschetz fue editor entre 1928 y 1958. El primer matemático mexicano que publicó un artículo en los *Annals* de Princeton fue Guillermo Torres en 1953 con los resultados de su tesis doctoral defendida en 1950. En 1954 Torres publica un segundo artículo en la misma revista, pero esta vez lo hace en colaboración con su director de tesis doctoral, Ralph Fox, con quien se doctoraran también John Milnor (ganador de la Medalla Fields) en 1954 y Francisco González-Acuña en 1970, sólo por mencionar al más reconocido de sus discípulos y a su discípulo mexicano mejor conocido en la actualidad, respectivamente.

Los siguientes matemáticos provenientes de la UNAM que se doctoraron en Princeton fueron José Adem (1952) y Samuel Gitler (1960); ambos lo hicieron bajo la supervisión de Norman Steenrod, quien, al igual que R. Fox, había sido alumno de Lefschetz. Un poco más tarde les siguió Santiago López de Medrano quien se doctoró en 1969 con William Browder, Francisco González Acuña a quien ya hemos mencionado y Elmar Winkelkemper quien lo hizo en 1971 bajo una codirección entre Dennis Sullivan y William Browder. De la misma generación y con los antecedentes de haber participado en los seminarios de Lefschetz debemos incluir a Alberto Verjovsky doctorado en 1973 en Brown University con Mauricio Peixoto y en codirección con el propio Lefschetz.

Como un punto de referencia interesante, mencionamos que hacia 1960, a menos de 20 años de su fundación, el Instituto de Matemáticas de la UNAM contaba con 20 investigadores entre quienes estaban oficialmente enlistados José Adem, Samuel Barocio, Javier Barros Sierra, Humberto Cárdenas, Manuel Cerrillo, Solomon Lefschetz, María Guadalupe Lomelí, Emilio Lluís, Rodolfo Morales, Juan Morcos, Alfonso Nápoles Gándara, Felix Recillas, Guillermo Torres, Remigio Valdés, Enrique Valle Flores, Roberto Vázquez, Francisco Zubieta y Gonzalo Zubieta. Por otra parte, el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN se creó en 1961, siendo el primer Director General Arturo Rosenblueth. Uno de los tres departamentos de investigación que integraban el CINVESTAV original fue el de Matemáticas y su primer director fue José Adem Chaín. La planta académica original quedó integrada por José Adem (topología algebraica), Samuel Gitler (topología algebraica), y Carlos Imaz Janke (ecuaciones diferenciales).

La Universidad Autónoma Metropolitana, por su parte, data de 1974, teniendo como primer Rector al Arq. Pedro Ramírez Vázquez. La investigación científica se ubicó en la Unidad Iztapalapa, que tuvo como primer rector a Alonso Fernández, y el primer Director de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería fue Carlos Graef Fernández en julio de 1974.

En 1980, con tan solo cuatro investigadores provenientes de la UNAM, se funda en la ciudad de Guanajuato el Centro de Investigación en Matemáticas, A.C., mejor conocido como CIMAT, institución que en muy poco tiempo aglutinaría a un importante grupo de matemáticos y científicos de la computación. Es el primero centro del sistema de centros de investigación del CONACYT cuya labor de investigación se orienta y especializa en matemáticas; actualmente sigue siendo el único con esta orientación y especialización específica en su misión. Sin embargo, hay grupos dedicados a las ciencias de la computación en el CICESE, INAOE e INFOTEC, además de haber

grupos especializados en métodos matemáticos diversos y sus aplicaciones en el CIO, CICESE e IPICYT.

Situación actual

Actualmente la matemática mexicana es reconocida por su investigación y resultados en prácticamente todas sus áreas de especialidad: álgebra, análisis, computación, ecuaciones diferenciales, estadística, geometría, probabilidad, robótica, sistemas dinámicos y topología. Las principales instituciones mexicanas de investigación y educación superior están concentradas en la UNAM (Facultad de Ciencias, IIMAS, Instituto de Matemáticas y CCM), el IPN (CINVESTAV y ESFM), la UAM y el CIMAT. Una estimación ‘gruesa’ del número de científicos dedicados a la matemática o al cómputo científico en el país con acreditación en el SNI es de cerca de mil investigadores.

En particular, el CIMAT es una institución organizada en tres departamentos: matemáticas, ciencias de la computación y probabilidad y estadística. Es el único centro CONACYT orientado hacia estas áreas de especialidad, aunque en el IPICYT hay un grupo productivo de matemáticas aplicadas y en el CICESE e INAOE hay grupos bien reconocidos dedicados a las ciencias de la computación. Además hay otros centros CONACYT con líneas de investigación explotables de manera conjunta como son el CIDE, el CIO, el CIMAV, el CentroGeo y el INFOTEC, por mencionar solamente unos ejemplos de ellos.

Tanto en México como en el mundo el CIMAT está considerado como una institución “consolidada” en sus áreas de especialidad. Su planta académica total, en su sede principal (Guanajuato), consta de cerca de 70 investigadores distribuidos como sigue: alrededor de 40 en el departamento de matemáticas, alrededor de 15 en probabilidad y estadística y alrededor de 15 en ciencias de la computación. Alrededor del 65% de su planta académica está ubicada en los niveles II y III del SNI. Los pilares estratégicos de la institución orientan sus principales programas hacia la investigación, la docencia, la vinculación y más recientemente hacia la promoción y la divulgación científica. Ha sido una institución pionera en México por su robusto programa de eventos, talleres, congresos y escuelas cortas del más alto nivel internacional.

Por su parte, el INAOE cuenta con un departamento de 23 investigadores en ciencias de la computación, 40% de los cuales tienen nombramientos II y III del SNI. Entre las especialidades que se desarrollan se encuentran el aprendizaje computacional, reconocimiento de patrones y minería de datos, relevantes a este PILA.

Recientemente y como una consecuencia de negociaciones entre el CONACYT, la NSF de EUA y las instancias canadienses *Natural Sciences and Engineering Research Council* (NSERC) y *Alberta Science and Research Authority* (ASRA), el Órgano de Gobierno del CIMAT aprobó la creación de una “estación de investigación continua” hermanada a la famosa *Banff International Research Station* (BIRS) for *Mathematical Innovation and Discovery* (<http://www.birs.ca>), cuyas actividades serán coordinadas de manera conjunta con el Instituto de Matemáticas de la UNAM. Su propósito es ser una sede alterna a BIRS para la realización de congresos, conferencias, escuelas y talleres en temas de investigación actual de las ciencias matemáticas. Cabe mencionar que en los años 1989-1994 el CIMAT fue una sede alterna del ICTP (*International Centre for Theoretical Physics* con sede en Trieste, Italia) para la realización de eventos académicos del mismo tipo.

Visión y temática actual

Las tendencias mundiales encaminan el avance y desarrollo de la matemática a lo largo de direcciones como la expansión del uso de los métodos computacionales como “medios experimentales” y así avanzar en el desarrollo de la herramienta matemática; tanto a nivel teórico, como a nivel de “tecnología de innovación” en sus aplicaciones. La visión moderna de la ciencia

matemática consiste en considerar a la disciplina en sí como un producto *'high-tech'*. También hay un esfuerzo global encaminado al entrenamiento de jóvenes matemáticos y científicos de la computación en la solución de problemas aplicados. Vale la pena mencionar que instituciones como el *Institute for Mathematics and its Applications* (IMA, <http://www.ima.umn.edu>) de Estados Unidos o como el PIMS, *Pacific Institute for the Mathematical Sciences* de Canadá (<https://www.pims.math.ca>) organizan regularmente talleres en la que estudiantes (principalmente de posgrado) integran equipos "multi-especialistas" para darle solución a problemas concretos planteados por empresas o industrias. En este renglón es motivo de orgullo mencionar que el CIMAT, desde hace más de ocho años celebra anualmente un "Taller de Solución de Problemas Industriales" con un formato enteramente similar a los seguidos por el IMA o el PIMS y en agosto de 2010 se llevó a cabo en México el primer taller conjunto de problemas industriales CIMAT-IMA-PIMS con la integración de cinco equipos con integrantes de cada uno de los tres países (<http://www.ima.umn.edu/videos/search.php?q=MM8.2-11.10>).

Además, hay esfuerzos importantes por impulsar las aplicaciones de la matemática ---además de a las ciencias físicas--- a las ciencias biológicas (bioestadística, bioinformática, etc.), así como a las ciencias de la Tierra (por ejemplo, *Mathematics of the Planet Earth*, <http://mpe2013.org>), a la atención de problemas derivados de la informática y la robótica, así como de las industrias de las telecomunicaciones y de los energéticos a través de programas que van desde la investigación básica del más alto nivel, hasta los programas educativos en los niveles elementales (como el *Advanced Scientific Computing Research* (ASCR), <http://science.energy.gov/ascr/research/applied-mathematics/> y *The Need Project*, <http://www.need.org>, respectivamente).

La modelación y la simulación de fenómenos y procesos es posible gracias al desarrollo y a la convergencia de diferentes áreas de especialidad de la matemática; entre ellas, las ecuaciones diferenciales (en todas sus versiones: ordinarias, parciales, no-lineales, estocásticas, etc.) y el análisis de sistemas dinámicos, en conjunción con métodos algebraicos, geométricos, probabilistas, estadísticos, numéricos y computacionales, solo por mencionar en forma breve una gama del amplio espectro de combinaciones posibles.

Retos futuros

Entre los retos más importantes que enfrenta la matemática mexicana en el mediano plazo están los siguientes, compartidos por todas los módulos de este PILA:

- (1) Acortar las grandes brechas que tenemos en materia de investigación y formación de recursos humanos de alto nivel; ya no digamos en comparación con los indicadores observados en países desarrollados, sino en países con economías similares a las de México, o países que de manera emergente han presentado en los últimos años un importante desarrollo científico y tecnológico;
- (2) Nutrir las plantas académicas de todos los departamentos de matemáticas, estadística y ciencias de la computación que hay en las instituciones de investigación y educación superior en el país con investigadores jóvenes y talentosos cuyas líneas de investigación estén orientadas hacia temas relevantes de actualidad; resulta muy importante poder reproducir eficientemente el exitoso despegar que vivió México en los inicios de su historia científica;
- (3) Abrir el abanico de responsabilidades del quehacer científico observado hacia terrenos más desafiantes que busquen un creciente número de aplicaciones, de colaboraciones multi y transdisciplinarias, y de más estrecha vinculación a los problemas nacionales, coadyuvando a sus soluciones;
- (4) Coordinar esfuerzos de desarrollo científico y tecnológico con los otros centros del sistema, por un lado, así como con las diversas instituciones de investigación científica (pura y aplicada) del

país, expandiendo los horizontes de las colaboraciones corporativas tendientes a fortalecer los proyectos de gran calado (ej., Laboratorios Nacionales).

Posibles derramas a largo plazo del conocimiento generado en este módulo

Como se ha mencionado, la matemática está en la base, incide e impacta en todos los desarrollos científicos y tecnológicos de todas las disciplinas. Además, lo hace a todos los niveles; desde sus fundamentos teóricos hasta sus aplicaciones más sofisticadas. Entre las tendencias recientes se encuentra el gran concierto de diferentes disciplinas que antes corrían a lo largo de desarrollos relativamente ajenos o con muy poca interacción entre ellas. Hoy en día se reconoce la importancia de conjuntar los métodos de la geometría y la topología, con los del álgebra y los del análisis y todos estos a su vez con los de las ecuaciones diferenciales, la estadística, la probabilidad y los métodos computacionales de gran poder con el fin de dar resultados eficaces en el entendimiento y avance de todas las ciencias; temas como bioinformática, bioestadística, biofísica y bioquímica matemática, análisis topológico de datos, 'big data', 'machine learning', etc., han sido el resultado de exitosas fusiones de métodos entre las diferentes disciplinas y subdisciplinas de la matemática. El impacto mejor reconocido quizá sea el que resulte de las aplicaciones a la medicina y a la biología, pero igualmente importante es el que se tiene a nivel del mejoramiento de la economía con su consecuente mejoramiento en la calidad de vida de la sociedad.

5.6 Instrumentación científica

Breve historia

a) Instrumentación astronómica

El INAOE, fundado en 1971, es heredero del Observatorio Astrofísico Nacional de Tonantzintla inaugurado en 1942 en torno al telescopio conocido como Cámara Schmidt. Contar con un instrumento de frontera permitió a Guillermo Haro y a sus colaboradores hacer grandes descubrimientos de objetos que se siguen estudiando hasta la fecha. El INAOE nace con un proyecto fundacional de desarrollar un telescopio de 2m de diámetro cuyo espejo fue pulido en Tonantzintla, iniciándose así la tradición en fabricación de óptica astronómica de precisión de diámetros grandes. También se desarrolló la estructura mecánica así como el control del telescopio, que actualmente sigue en operación en el Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH), en Cananea, Sonora.

El avance en la tecnología y el conocimiento, desde mediados de la década de los años cincuenta, transformó el enfoque basado en la observación de la parte visible del espectro hacia una astronomía observacional multi-longitud de onda, de tal forma que se han desarrollado grandes telescopios e instrumentos con tecnologías muy diferentes; algunos a bordo de satélites y otros en Tierra. En este escenario, el Gran Telescopio Milimétrico Alfonso Serrano (GTM) y el observatorio *High-Altitude Water Cherenkov* (HAWC) son instalaciones líderes en sus respectivos campos a nivel mundial. México es socio (5%) del Gran Telescopio Canarias (GTC) de 10.4m de diámetro, ubicado en La Palma, Islas Canarias. La contribución mexicana a estos proyectos ha sido financiada mayormente por CONACYT.

b) Instrumentación en microscopía láser

Las técnicas modernas de microscopía láser son hoy en día técnicas del estado del arte que han demostrado tener gran potencial de utilidad en biología, medicina y nanociencias. Ejemplo de ellas

son la microscopía multifotónica, o microscopía no lineal; la confocal fluorescente; la de campo cercano y la de fuga de radiación, por mencionar algunas. Cada una con sus ventajas y desventajas en resolución espacial, que pueden ir por debajo del límite de difracción, y rapidez de adquisición de imágenes. Mientras que con la microscopía confocal es posible obtener imágenes a velocidad de video tipo tomográficas a nivel sub-celular, tanto de tejido conectivo como en sistemas biológicos celulares utilizando marcadores fluorescentes, las técnicas no lineales poseen la misma ventaja de obtener seccionado óptico sumada a la ventaja de extraer información de contraste y estructura supramolecular, aunado a la toma de imágenes de una forma no destructiva y no invasiva, es decir, sin la necesidad de fijar, tefñir o marcar con proteínas fluorescentes. No obstante, las técnicas basadas en procesos ópticos no lineales requieren de sistemas láseres de pulsos ultracortos que emiten luz infrarroja con intensidades capaces de generar luz en el visible únicamente en el plano de enfoque. De ahí que el desarrollo de estas técnicas de instrumentación en microscopía está acompañado del desarrollo de fuentes láser de baja duración del pulso, alta potencia pico, alta frecuencia de repetición y de energía de la luz infrarroja. Esto con el fin de obtener eficiencia de generación de señal, menos daño biológico, rapidez de video, máxima penetración (en tejido por ejemplo) y buena resolución óptica comparada con la microscopía confocal.

Asimismo, existen técnicas de microscopía que rebasan el límite de resolución óptica tales como la microscopía de campo cercano y de fuga de radiación. Estas técnicas llamadas también de super-resolución tienen además ciertas ventajas sobre métodos tradicionales de microscopía electrónica y de barrido de sonda. Al ser técnicas ópticas, los mecanismos de contraste son los mismos empleados por el ojo humano, haciendo que la interpretación de las imágenes sea más sencilla. Se utilizan para entender fenómenos ópticos a escala nanométrica, y su desarrollo ha sido motivado por los avances tan rápidos en la nanociencia y nanotecnología y por las necesidades de adecuar la instrumentación y estrategias de fabricación, manipulación y caracterización a escala nano y micrométrica. Además, se prestan para la implementación de técnicas espectroscópicas y de fluorescencia, por lo que resulta de gran interés para estudios químicos y biológicos a escalas nanométricas.

Situación actual

En el caso de la instrumentación astronómica existe el grupo de instrumentación en el INAOE que trabaja la óptica, criogenia y electrónica para la observación en longitudes de onda visibles, infrarrojas, milimétricas, radio, así como en altas energías. En el CIDESI se tiene experiencia colaborando en proyectos de instrumentación astronómica visible y en aplicaciones criogénicas para detectores en el visible y en el cercano infrarrojo. En el CIO se ha desarrollado también óptica astronómica para el visible. Existe también una comunidad de instrumentación en el Instituto de Astronomía de la UNAM tanto en Ciudad Universitaria como en la sede de Ensenada, ambos grupos con experiencia en el visible y en el cercano infrarrojo. Entre todos estos grupos sólo cerca de 10 personas son investigadores y tecnólogos con un doctorado en astronomía, en instrumentación astronómica o en áreas afines, dedicados de lleno al desarrollo de instrumentación astronómica. Estos doctores en algunos casos dirigen a grupos de ingenieros y técnicos. Además existen otros aproximadamente 20 investigadores que colaboran e incluso encabezan el desarrollo de instrumentación astronómica en el país, simultaneando este trabajo con investigación en ciencia básica.

En México el único programa de maestría y doctorado en instrumentación astronómica es el que ofrece el INAOE. Algunos egresados se han incorporado a la industria o han formado sus propias empresas, otros se han incorporado a la Agencia Espacial Mexicana o a otras instituciones de educación superior. La comunidad es aún reducida y los proyectos tanto nacionales como internacionales requieren un mayor número de doctores dado los niveles de complejidad de los instrumentos de nueva generación.

Las técnicas modernas de microscopía láser mantienen aún un auge experimental sin llegar a un prototipo comercial. No obstante, el conocimiento generado en este tema sigue en continuo aumento desde hace un par de décadas, con el fin común de transferir todo su potencial a un solo instrumento robusto láser-microscopio. Esto se ha logrado parcialmente en el área de la microbiología mediante su implementación en sistemas comerciales de microscopios y el uso de fibras ópticas, pero los esfuerzos para un sistema aplicado a la medicina clínica sigue siendo un tema de frontera en todo el mundo. En México, en particular, el desarrollo de estas microscopías es aún escaso pero existen centros CONACYT (CICESE, CIO e INAOE) y otras instituciones educativas públicas y privadas (UNAM, ITESM) con gran potencial para incursionar en el tema de desarrollo de instrumentación en láseres y microscopía avanzada para aplicaciones en ciencias biológicas, médicas y de nanociencia. En el total de estos centros se emplean alrededor de 13 investigadores con estas líneas de investigación. Otros 7 desarrollan, adicionalmente, pinzas ópticas en combinación con canales microfluídicos, propiedades visco elásticas de material biológico, motores moleculares, haces estructurados, conexiones neuronales. Estos elementos potencialmente permitirán desarrollar técnicas avanzadas de microscopía láser en CICESE, INAOE, IPICYT-UASLP, IF-UNAM, CFATA-UNAM, ICS-UV y UAMI.

Visión y temática actual

a) Instrumentación astronómica

Los telescopios requieren el desarrollo continuo de nuevos instrumentos con mayor sensibilidad que permitan observar objetos cada vez más débiles y/o lejanos o bien con mayor resolución espacial o espectral, optimizando de esta manera la fuerte inversión en estas grandes infraestructuras. En este contexto, el INAOE en colaboración con el CIO está desarrollando la óptica de un nuevo espectrógrafo de campo integral y multiobjeto para el GTC que permitirá observar tanto objetos extendidos en nuestra galaxia como cúmulos de objetos distantes, mediante un centenar de microrobots. El INAOE es el socio principal de la Universidad Complutense de Madrid (España) dentro del consorcio MEGARA en que participan también el Instituto de Astrofísica de Andalucía y la Universidad Politécnica de Madrid (España). Se trata de un consorcio de gran visibilidad internacional. Como resultado de nuestra participación en MEGARA, el INAOE y el CIO han sido invitados a participar en otro proyecto de un espectrógrafo multi-objeto llamado WEAVE para el telescopio William Herschel de 4m, ubicado en La Palma. Se trata de un consorcio formado por 14 instituciones europeas en que la institución líder es la Universidad de Oxford (Gran Bretaña). Asimismo, el INAOE ha recibido invitaciones para participar en licitaciones para la fabricación de óptica astronómica del Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón (España).

Debido a los requerimientos y la magnitud de los proyectos mencionados, la infraestructura para la fabricación de óptica tanto en el INAOE como en el CIO se ha modernizado de forma considerable. Es importante mencionar que estos proyectos al exigir estándares internacionales han obligado a las instituciones a fortalecer la capacitación del personal técnico, a formar doctores especializados en estas áreas y a una nueva forma de organización interna e interinstitucional.

El INAOE en colaboración con la Universidad de Massachussets en Amherst (EUA), la Universidad de Cardiff (Gran Bretaña) y la Universidad Estatal de Arizona (EUA) está también desarrollando un instrumento de segunda generación para el GTM, llamado TOLTEC, con detectores fabricados en los laboratorios del INAOE. Se trata de una cámara de ondas milimétricas (150-300 GHz) que operará a temperaturas criogénicas, 250 mK, para alcanzar la sensibilidad requerida para detectar las ondas milimétricas emitidas en el Universo temprano. El prototipo de este instrumento, con 100 pixeles observando en una sola frecuencia, está liderado por el INAOE dentro de la misma colaboración. El INAOE cuenta con un laboratorio especializado para pruebas y desarrollo de instrumentos para estas longitudes de onda que se ha ido equipando a través de diversos

mecanismos. Provee la suficiente infraestructura para diseñar, probar e integrar sistemas de detección de ondas milimétricas a temperaturas hasta de 220 mK. Se hacen investigaciones a temperaturas criogénicas de las propiedades eléctricas de detectores semi y superconductores, así como estudios de las propiedades térmicas y mecánicas de diversos materiales susceptibles a ser usados como filtros de ondas milimétricas, y se estudia el desempeño de electrónica superconductor para la lectura de detectores de ondas milimétricas. Este laboratorio es una pieza fundamental en la formación de recursos humanos especializados de maestría y doctorado del posgrado de instrumentación astronómica del INAOE. En este laboratorio también se está desarrollando un criostato para el proyecto MEGARA que operará a 100 K.

b) Telescopios

Con la participación en el TSPM6.5 se incursiona con paso firme en el diseño de grandes infraestructuras por parte del CIDESI. Además, INAOE tiene una rica tradición en la puesta a punto, afinado de la ingeniería y pruebas exhaustivas de verificación de grandes telescopios, entre los que resaltan más recientemente GTM y HAWC, y antes el OAGH.

c) Microscopía láser

El desarrollo de instrumentación de fuentes láser y microscopía moderna ha mantenido un vigoroso auge experimental, pero no ha llegado a un prototipo comercial. Se requiere implementar los avances realizados, mediante su construcción total o parcial, y adaptarlos a sistemas comerciales. En México existen centros como CICESE, CIO e INAOE así como otras instituciones educativas públicas y privadas, como la UNAM y el ITESM, con gran potencial para incursionar en el desarrollo de instrumentación en láseres y microscopía avanzada para aplicaciones en ciencias biológicas, médicas y de nanociencia.

Retos futuros

Los centros CONACYT que han construido elementos en proyectos de instrumentación astronómica internacional han demostrado su capacidad. Una prueba reciente de ello es el exitoso desempeño de una nueva cámara astronómica, del experimento PAU, para el telescopio William Herschel, cuya óptica fue fabricada en el CIO mediante la alianza estratégica INAOE/CIO. Asimismo en proyectos como MEGARA o WEAVE la contribución mexicana ha sido muy ambiciosa, empujando los límites de la capacidad técnica del país. México debe aprovechar la experiencia adquirida para explorar su participación en los instrumentos de los grandes telescopios espaciales y terrestres. Lo anterior puede lograrse afianzando las colaboraciones existentes con consorcios europeos mediante la participación en nuevos proyectos. En dichos proyectos los centros CONACYT deben mejorar continuamente sus estándares tanto tecnológicos como organizativos. Para cumplir con los calendarios de proyectos internacionales se requiere asimismo infraestructura dedicada y personal técnico mejor calificado.

Uno de los grandes retos para los instrumentos de la siguiente generación de telescopios óptico-infrarrojos de 30m – 40m de diámetro es el diseño y fabricación de superficies ópticas de diámetros grandes, mayores de 500 mm, de forma libre. Por un lado, el diseño de las superficies de forma libre requiere de mucha mayor capacidad de cómputo. Por el otro, la fabricación es mucho más compleja y deben desarrollarse máquinas de control numérico únicas para esas dimensiones, con así como contar con personal mucho mejor calificado para operarlas. Asimismo deben desarrollarse pruebas ópticas específicas.

Con la experiencia adquirida en la participación en consorcios internacionales para la construcción de instrumentación así como en la construcción y operación de grandes observatorios como GTM y HAWC, México debe liderar un instrumento de segunda generación para el GTM. Idealmente

desde la etapa de estudio de factibilidad, diseño conceptual, diseño preliminar, diseño detallado, fabricación, aceptación, integración, instalación, pruebas y operación en el telescopio. Para lograrlo se requiere contar con un grupo consolidado de tecnólogos expertos en instrumentación y de gestores o gerentes de proyectos científicos.

Es pertinente e indispensable generar más apoyo de infraestructura y equipo para la construcción de laboratorios especializados en instrumentación óptica necesaria para desarrollar investigación aplicada y multidisciplinaria, que ha ido cada vez más en aumento en México en estos últimos años.

Por otro lado, dada la complejidad de los proyectos de instrumentación se requiere la participación de estudiantes de posgrado así como de la contratación de ingenieros y de personal técnico. Todos ellos adquieren conocimientos de muy alto nivel y herramientas de gestión/organización que aplicarán en la sociedad una vez que se integren al mercado laboral fuera de los centros de investigación.

Si bien ha habido logros significativos es indispensable continuar el esfuerzo así como desarrollar nuevas estrategias para alcanzar el objetivo fundamental de crear conocimiento y desarrollo tecnológico en el campo de la instrumentación científica. Entre las metas a mediano plazo podemos resaltar las siguientes:

- Consolidar un grupo de tecnólogos, doctores en instrumentación o área afines para llevar a cabo proyectos de desarrollo tecnológico de frontera en consorcios nacionales e internacionales.
- En sensores es indispensable alcanzar el estado del arte en control de calidad para fabricación en micro y nano electrónica, la uniformidad en arreglos y repetitividad entre corridas de fabricación, alcanzar los límites teóricos de sensibilidad, así como apoyar el desarrollo de nuevos materiales y topologías.
- Formar un grupo de científicos e ingenieros de alto nivel que desarrollen nuevas metodologías de manufactura basadas en cálculos y modelos.
- Formar un grupo de científicos en el área de diseño y fabricación de recubrimientos antirreflejantes, dedicado a enfrentar los retos tecnológicos que demanda la óptica para instrumentos científicos.

Posibles derramas a largo plazo del conocimiento generado en este módulo

El desarrollo de instrumentación científica, que de forma permanente lleva al límite la tecnología en óptica, mecánica, electrónica y de software, promueve asimismo la interacción con empresas dispuestas a emprender proyectos de frontera. Dichas empresas se benefician al desarrollar nuevas habilidades/competencias requeridas por este tipo de proyectos. Se trata de un beneficio a las empresas ya que posteriormente aplican los conocimientos adquiridos en otros proyectos en la industria. Adicionalmente, se traduce en proyección internacional de dichas empresas. Por ejemplo, en el caso de la optomecánica de MEGARA se trabaja con una empresa en Monterrey que logró precisiones de 0.050 mm en diámetros de 300mm y longitudes de 500mm. Empresas españolas aseguraron que se trataban de precisiones imposibles de alcanzar y al darse a conocer las prestaciones de la industria mexicana ha llevado a que otros grupos internacionales se interesen en que la optomecánica de otros proyectos de instrumentación se desarrolle en México.

La experiencia ganada por el CIDESI en el desarrollo de mecánica de precisión aplicada en optomecanismos para instrumentación astronómica también ha llevado a generar equipos de trabajo que se han ido especializando en el diseño y manufactura de este tipo de componentes. A través de la puesta en marcha de los componentes diseñados y manufacturados ha quedado demostrado que los trabajos realizados cumplen con los niveles de especialización y calidad de compañías

extranjeras tanto de EUA como europeas, entrando así en el grupo selecto de empresas a nivel mundial que se dedican al diseño y fabricación de instrumentación especializada para telescopios. La infraestructura del CIDESI ha ido creciendo para poder cubrir las necesidades de la fabricación de componentes con alta precisión. Se ha requerido asimismo la formación de personal especializado para la manufactura de los mismos

La vinculación de los centros CONACYT con la industria aeroespacial es una gran ventana de oportunidad. La tecnología empleada en el diseño y fabricación de los componentes de instrumentos astronómicos cumplen con estándares espaciales, de tal forma que puede haber una migración natural para construir componentes que se puedan utilizar en la rama aeronáutica. En particular, existe un clúster aeronáutico en el estado de Querétaro en el que hay empresas importantes atraídas por el trabajo realizado en este tipo de proyectos y ven en los centros participantes, en particular en el CIDESI, un área de oportunidad para poder generar proyectos conjuntos, lo que contribuirá a una mayor especialización del equipo de trabajo en el diseño y construcción de componentes de alta tecnología

El desarrollo de diferentes tipos de detectores astronómicos para diversas longitudes de onda, se ha aplicado a escala comercial por empresas fabricantes de sensores infrarrojos, como los bolómetros micro-puente para el infrarrojo. En el INAOE se cuenta con un laboratorio de LiMEMS (*Micro Electro Mechanical Systems*) donde es posible fabricar distintos tipos de sensores a nivel de prototipo. Estos tipos de detectores se utilizan en defensa, seguridad y medicina, además de las aplicaciones científicas para los que son diseñados.

La formación de personal altamente cualificado en el desarrollo de prototipos de instrumentación científica, al límite tecnológico de lo posible, con soluciones inéditas usualmente consecuencia de nuevos avances en ciencia básica, es un activo incalculable para la sociedad. Es de destacarse, como ejemplo, que el Centro de Ingeniería del INAOE, que desarrolla prototipos para la industria y el sector gubernamental de defensa, está regentado por un ingeniero cuya formación por años fue en desarrollo de instrumentación astronómica.

6. Estructura temática del PILA

Se subraya que la estructura modular del PILA tiene nombres distintos de las ciencias clásicas que se describen en la sección 5 para enfatizar la concurrencia de competencias de diferentes ciencias en un mismo campo de investigación y el deseo de una mayor interacción entre centros en cada uno de los módulos como planteamiento a futuro.

6.1: El Universo que nos rodea

El conocimiento del cosmos desde el punto de vista astronómico está labrado en estos momentos únicamente por el INAOE dentro del conjunto de centros CONACYT, quien mantiene fuertes vínculos con otros centros de investigación en universidades nacionales e internacionales. Esta línea de investigación abarca los campos de astrofísica y cosmología.

Las líneas de investigación que se desarrollan y se plantean desarrollar (y aquellas más a futuro, marcadas con asterisco) son las siguientes:

- 1) Cosmología: energía oscura, materia oscura, propiedades (y parámetros) globales del Universo, estructura a gran escala, cúmulos de galaxias;
- 2) Formación y evolución de galaxias: hoyos negros, núcleos activos de galaxias, brotes de formación estelar, cúmulos estelares, dinámica;

- 3) Medios difusos calientes y fríos, circunestelares, galácticos e intergalácticos;
- 4) Formación y evolución estelar: atmósferas estelares, etapas tempranas, astero-sismología*, objetos compactos;
- 5) Formación y evolución planetaria: discos, exoplanetas*, habitabilidad*;
- 6) Astropartículas y relación con leyes fundamentales de la física*.

Los métodos para llevar a cabo investigación en estas áreas del conocimiento son principalmente observacionales, aunque también hay incidencia en métodos teóricos analíticos y por simulación numérica. Los métodos observacionales se asocian a observatorios de tecnología de vanguardia que encabezamos o de la que somos socios: Gran Telescopio Milimétrico Alfonso Serrano (GTM), Gran Telescopio Canarias (GTC), arreglo *High Altitude Water Cherenkov* (HAWC), Telescopio de San Pedro Mártir de 6.5m (TSPM6.5) y Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH). Además de estos observatorios también se utiliza infraestructura nacional e internacional bajo competencia y otra infraestructura más pequeña dedicada a proyectos específicos.

Ofrecemos a continuación un breve resumen de esta infraestructura, que agrupa de forma natural a investigadores que la utiliza para resolver la temática arriba mencionada:

- a) Gran Telescopio Milimétrico Alfonso Serrano (GTM): El GTM de 50m de diámetro es el proyecto científico mexicano más ambicioso de su historia. Se trata de una colaboración binacional entre México y la Universidad de Massachusetts en EUA. El telescopio está situado en el volcán Tlitépetl (Pue.). El GTM está dotado de instrumentos que permiten obtener imagen y espectroscopía entre los 0.8 y 4mm. Los objetivos científicos son amplios, pero se engloban en el estudio de la formación y evolución temprana de las estructuras astronómicas a lo largo de la historia del Universo. Esta infraestructura complementa la larga tradición en astronomía infrarroja desarrollada en el INAOE, con oportunidades científicas atractivas para la comunidad nacional e internacional. En 2013 empezó a funcionar con la primera campaña de observaciones científicas tempranas, bajo riesgo compartido, ofrecida abiertamente a los científicos del país y de la universidad estadounidense socia. El primer artículo científico se publicó a finales de 2014. Se espera que la infraestructura tenga un periodo de explotación científica de al menos unos 30 años, con inversión de renovación de telescopio e instrumentos para mantenerla competitiva a nivel internacional.
- b) *High Altitude Water Cherenkov* (HAWC), observatorio situado en las faldas del Tlitépetl (Pue.), conformado por un conjunto de 300 detectores de rayos cósmicos y gamma, sensible a energías que van desde cientos de GeV hasta decenas de TeV. Se trata de una colaboración mexicano-estadounidense de más de 20 instituciones de prestigio, entre ellas el INAOE. El telescopio permite estudiar los objetos compactos y procesos violentos del Universo como hoyos negros, púlsares, supernovas, estallidos de rayos gamma o núcleos galácticos activos. Además permite realizar estudios de física fundamental sobre astropartículas. Se opera con un número parcial de detectores desde 2013. Se inauguró en marzo de 2015 habiendo completado su integración de detectores. Su primera publicación científica data de finales del 2014. Se planean unos 10 años de operación científica.
- c) Gran Telescopio Canarias (GTC): El GTC de 10.4m es el telescopio óptico más grande del mundo en la actualidad. El proyecto está financiado en un 90% por España, en combinación con el Observatorio Europeo Austral, 5% México, a partes iguales INAOE e Instituto de Astronomía-UNAM, y ofrecido a toda la comunidad mexicana, y 5% Universidad de Florida de EUA. México dispone de tan sólo unas 50 horas de utilización anual, y de unas 30 para proyectos de colaboración México-España. Es una pequeña fracción de tiempo para incidir en proyectos que involucran objetos débiles y/o lejanos, como galaxias azules a grandes distancias cósmicas, derivación observacional de parámetros cosmológicos, o abundancias químicas del medio interestelar difuso, entre

otros. Está en operación desde 2009, datando su primer artículo científico del 2010. Se espera que opere por varias décadas.

- d) Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH), es un observatorio a disposición de toda la comunidad nacional, pero sobre el que el INAOE tiene control de su destino. El instrumento principal es un telescopio óptico de 2.1m y cuenta con instrumentos óptico/infrarrojos (0.3 a 3 μ m), algunos de los cuales han sido construidos en el propio INAOE. El observatorio está en funcionamiento desde 1987, y el primer artículo científico data de 1994. Sigue siendo un telescopio productivo desde el punto de vista científico. Su limitada apertura permite observar eficientemente poblaciones estelares en galaxias cercanas, núcleos galácticos activos, estrellas y sus sistemas protoplanetarios, y un sinnúmero de proyectos donde la emisión estelar es importante en el Universo cercano.
- e) Telescopio San Pedro Mártir 6.5m (TSPM6.5) es un proyecto parcialmente financiado para realizar su estudio de viabilidad y diseño crítico, resultado de una iniciativa impulsada por el INAOE hace más de 10 años para instalar un telescopio óptico grande en México con la colaboración de Universidad de Arizona (UA). Desde entonces la UNAM y el Observatorio Smithsonian de EUA se han convertido en socios. En la actualidad se concursa por los fondos para realizar el proyecto. Se espera que en la próxima década ésta sea infraestructura óptica observacional al servicio de la comunidad binacional. Su objetivo principal es expandir la distancia promedio accesible para realizar imagen y espectroscopía óptica/infrarroja del Universo a distancias cósmicas grandes (hasta ~30 mil millones de años luz), superando la limitante para poder estudiar los procesos dominados por estrellas que actualmente son accesibles con los telescopios nacionales (de tan solo 2 metros de diámetro). CICESE e INAOE están fuertemente comprometidos con este proyecto.

6.2 Ciencias de la Tierra

Las ciencias de la Tierra se concentran en el estudio de procesos naturales que ocurren en la litósfera, la hidrósfera y la atmósfera. Esta área de investigación se ha desarrollado en todos los centros que albergan un grupo de geociencias, incluyendo CICESE, IPICYT y CICY, donde está soportada por el trabajo colaborativo de investigadores de universidades nacionales y extranjeras.

Los temas principales en los que se trabaja son:

- a) Litósfera
- Procesos de ruptura continental y evolución del fondo oceánico en el Golfo de California: reología; estructura elástica y viscoelástica; estructura térmica; deformación del manto y de la corteza; integración e inversión conjunta de datos geofísicos.
 - Exploración geotérmica y de recursos naturales: estudios de flujo de calor, de provincias geotérmicas, y de manifestaciones termales y acuíferos, entre otros.
 - Deformación, esfuerzo y sismicidad durante el ciclo sísmico: deformación cosísmica, postsísmica e intersísmica; acumulación de esfuerzo entre sismos en zonas de fallas activas; impacto de grandes sismos en sismicidad local; variaciones temporales del campo electromagnético antes y después de terremotos.
 - Procesos geológicos en márgenes transformantes, *rifts*, zonas de subducción y acreción tectónica: geoquímica, petrología, geocronología y geohidrología.
 - Formación, evolución y destrucción de corteza continental a través del tiempo: acreción magmática vs. delaminación y erosión por subducción – crecimiento continental por fusión parcial del manto vs. reciclaje de corteza continental hacia el manto: geoquímica, modelado multi-isotópico, geocronología.
 - Evolución cortical de márgenes continentales: origen y edad de protolitos del basamento cristalino, definición y estudio de los diferentes eventos tectonotermales que afectaron el borde continental a través del tiempo y reconstrucción de su posición en el contexto

paleogeográfico: petrología ígnea y metamórfica, geotermobarometría, geocronología (termocronología), paleomagnetismo.

- Atenuación sísmica regional y local, relaciones de escalamiento de la fuente sísmica y aplicaciones para peligro sísmico.
- Estudios de la fuente sísmica: modelos teóricos y aplicaciones.
- Análisis y uso de datos sísmicos para problemas ambientales y de fenómenos naturales.

b) Hidrósfera

- Oceanografía fisicoquímica observacional: circulación en el Golfo de México, Mar Caribe, Pacífico Mexicano, Golfo de California
- Dinámica de fluidos geofísicos: modelos teóricos y experimentales
- Modelación numérica del océano: desarrollo de modelos y asimilación de datos
- Dinámica de sedimentos, lagunas costeras, mares regionales y puertos
- Oleaje y tsunamis
- Turbulencia
- Interacción océano-atmósfera
- Energía oceánica

c) Atmósfera

- Interacción océano-atmósfera
- Análisis y pronóstico del tiempo
- Mediciones meteorológicas y sus aplicaciones
- Ciclones tropicales y otros eventos hidrometeorológicos extremos
- Monzón de América del Norte
- Calentamiento global
- Variabilidad climática y ENSO
- Interacción océano-atmósfera
- Ciclo diurno
- Contaminación atmosférica
- Micrometeorología y turbulencia de la capa planetaria
- Desarrollo y uso de modelos numéricos
- Dinámica de la atmósfera
- Convección
- Física de nubes
- Radiación solar

6.3 Interacción luz-materia

Los temas del módulo interacción luz materia se desarrollan en tres de los centros CONACYT, que son el CICESE, el CIO y el INAOE. Actualmente hay poca interacción entre los grupos. Para mejorar esta situación, sería deseable apoyar laboratorios comunes con equipo mayor e instrumentar un programa de proyectos de cooperación y de intercambio de postdocs entre los centros.

Los temas principales de trabajo son:

a) Biofotónica y microscopía óptica

Incluye estudios de propagación de luz en tejidos, así como su caracterización y modificación por métodos ópticos; por ejemplo, ondas de densidad de fotones, ablación de tejidos, diagnósticos ópticos de tejido y terapia fotodinámica. Incluye también el desarrollo de nuevos métodos y técnicas de formación de imágenes como la tomografía óptica coherente, la formación de imágenes en THz, y las microscopías de campo cercano, fluorescencia, confocal, no lineal y Raman. Se consideran también estudios en fotobiología, microfluidos y pinzas ópticas.

b) Esparcimiento y óptica estadística

Incluye coherencia y fluctuaciones en campos de luz, fotoestadística, detección y conteo de fotones, moteado láser, esparcimiento de luz por superficies y partículas, esparcimiento múltiple, propagación de luz y formación de imágenes en medios no homogéneos y turbulentos.

c) Láseres y fuentes novedosas de luz

Incluye el desarrollo de todo tipo de láseres, amplificadores ópticos, pulsos ultracortos y ultraintensos, y fuentes de luz especializadas, como fuentes no clásicas, de rayos X, de terahertz y de UV extremo.

d) Materiales y metamateriales ópticos

Incluye cristales fotónicos, metamateriales ópticos, grafeno, medio efectivo y materiales compuestos, materiales orgánicos con aplicaciones en fotónica. También incluye cristales líquidos, puntos cuánticos, materiales láser, magneto-ópticos, fotorrefractivos y materiales fluorescentes y luminiscentes.

e) Óptica cuántica

Incluye entrelazamiento cuántico, enfriamiento láser, electrodinámica cuántica de cavidades, procesos multifotónicos, computación y criptografía cuánticas.

f) Óptica no lineal y procesamiento óptico de materiales

Incluye generación de armónicos, mezclado de ondas, procesos multifotónicos, osciladores paramétricos y amplificadores ópticos, fenómenos ultrarrápidos, solitones, fenómenos de autoenfocamiento, absorción no lineal, esparcimiento Raman y Brillouin, generación de supercontinuo, óptica no lineal de superficies, ablación láser y estudios de interacción láser-materia con fluencias por arriba y por debajo del umbral de ablación.

g) Plasmónica y nanofotónica

Incluye cristales fotónicos, metamateriales ópticos, óptica electromagnética, plasmones polaritones de superficie, plasmones localizados de superficie, dispositivos ópticos microelectromecánicos y nanolitografía.

6.4 Propiedades físicoquímicas de la materia

Los centros de investigación del sistema que hacen investigación básica en materia condensada en estos momentos son el CIMAV y el IPICYT.

El CIMAV tiene como misión realizar investigación científica, desarrollo tecnológico y formación de recursos humanos con criterios de excelencia en las áreas de Materiales, Energía y Medio

Ambiente, para contribuir a impulsar el desarrollo sustentable regional y nacional de los sectores productivo y social.

El IPICYT, por su parte, es un centro de investigación multidisciplinaria en el que una de sus divisiones se dedica al estudio teórico y experimental de materiales avanzados. Además cultiva las ciencias naturales y exactas, con grupos académicos multidisciplinarios altamente especializados e infraestructura de primer nivel.

El punto de contacto entre ambas instituciones es el estudio experimental y teórico de materiales magnéticos en sus fases macro y nanoestructuradas.

Los temas de investigación sobre los que se trabaja actualmente son:

- a) Estudio de las propiedades magnéticas de sistemas nanométricos.
- b) Métodos de física matemática aplicados a sistemas biológicos.
- c) Propiedades electrónicas de materiales orgánicos
- d) Estudio de materiales semiconductores nanoestructurados
- e) Estudio de las propiedades magnéticas de nuevos materiales.
- f) La base de datos abierta sobre propiedades físicas "MPOD" (<http://mpod.cimav.edu.mx>).
- g) Materiales ferroeléctricos y multiferroicos magnetoeléctricos.

Además de estos temas, los temas que deseamos abordar a futuro que son de gran relevancia actual, en la frontera del conocimiento, y para los que se requiere de la contratación de investigadores tanto teóricos como experimentales son los siguientes:

- h) Propiedades magnéticas de tierras raras. Es uno de los temas de mayor relevancia actual, sin embargo se cuenta con un número muy reducido de investigadores en esta área.
- i) Propiedades magnéticas de agregados de metales de transición adsorbidas sobre grafeno. El grafeno es un sistema bidimensional de átomos de carbono con una estructura cristalina hexagonal. Este sistema tiene propiedades fisicoquímicas excepcionales, las cuales incluyen: una alta movilidad electrónica, transporte balístico, efecto Hall cuántico, y una gran facilidad para funcionalizarlo. Todo esto lo hace un buen candidato para la próxima generación de materiales electrónicos. El comportamiento de materiales magnéticos adsorbidos en grafeno es un tema de investigación de actualidad.
- j) Espintrónica. Con el desarrollo de nuevos materiales magnéticos en los que el nivel de Fermi cae dentro del *gap* de electrones con espines opuestos permite extraer electrones con el mismo espín. De esta manera se podrá pasar de la electrónica tradicional, la cual usa electrones sin tomar en cuenta el espín, a circuitos electrónicos que usan electrones con polarización de espín.

6.5 El lenguaje del Universo

La estructura temática de la sección dedicada a la investigación básica en matemáticas y cómputo científico se propone, por un lado, mantener productivas las líneas de especialización que han probado haber sido científicamente redituables en los últimos 20 años y, por otro lado, respaldar

los esfuerzos más recientes por abrirse hacia las nuevas líneas de investigación que el avance científico y tecnológico ha traído consigo.

Por razones histórico-evolutivas, el CIMAT nació, creció y se desarrolló como el centro del sistema centros CONACYT dedicado a la investigación, la aplicación y la enseñanza de nivel superior en matemáticas, estadística y cómputo científico. Desde la base que este PILA busca una mayor interacción, comunicación y colaboración transversal entre los diferentes centros, se reconoce la importante y creciente labor en investigaciones y aplicaciones realizadas en estas disciplinas desde otros centros como lo son el CICESE, el INAOE, el IPICYT, el Infotec, el CentroGeo, el CIDE y el CIO, por mencionar algunos de ellos. Es un importante reto y excelente área de oportunidad la búsqueda de temas de investigación pura y aplicada con colaboraciones que integren y vinculen a los diferentes grupos de dichos centros. En particular, al menos las sedes del CIMAT en las ciudades de Monterrey, Aguascalientes y Mérida, comparten ahora campus con varios de estos centros y comienzan a plantearse y generarse proyectos conjuntos importantes. Los laboratorios nacionales de Geointeligencia y de Política Pública, por mencionar solamente dos, constituyen una potencial fuente inicial de fructíferas colaboraciones con productos en el terreno de las aplicaciones, la innovación y los desarrollos tecnológicos. Las líneas de investigación clásicas en lenguaje del Universo labradas en los centros son:

A.1 Álgebra, gráficas y combinatoria con sus diferentes orientaciones

A.2 Análisis y sus aplicaciones

A.3 Cómputo científico; reconocimiento de patrones, procesamiento de imágenes, de señales y de datos en general

A.4 Ecuaciones diferenciales y sistemas dinámicos con sus diferentes orientaciones (sistemas dinámicos discretos o diferenciables y sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias, parciales, no-lineales, estocásticas, etc.)

A.5 Aplicación de métodos teóricos a la solución de ecuaciones (existencia, regularidad, métodos de simetría, de optimización, aleatorios, numéricos, computacionales, etc.).

A.6 Geometría y topología en sus diferentes versiones (algebraicas y diferenciales; estructuras topológicas y geométricas especiales; métodos de simetría).

A.7 Probabilidad y estadística; modelos predictivos, series de tiempo, inferencia estadística, diseño de experimentos, modelación estocástica con sus diversas aplicaciones, etc.

A.8 Explotación de la infraestructura y recursos informáticos de gran calado.

Estrategias

La estrategia para conseguir abrirse camino en las nuevas líneas de investigación sigue las pautas marcadas por las estrategias de los grandes programas de desarrollo de la matemática y del cómputo científico en la Unión Europea, Estados Unidos y Canadá:

A. Fortalecimiento de los grupos y líneas de investigación, a través de la formación de recursos humanos en dichas líneas e incorporación de nuevos jóvenes científicos en los grupos existentes.

B. Desarrollo de nuevos grupos y exploración de nuevas líneas de investigación, principalmente motivadas, aunque no exclusivamente, por su potencial de aplicabilidad a la solución de problemas planteados por sectores como salud, energía, telecomunicaciones, y explotación óptima y significativa de datos y recursos informáticos. Esto, mediante la celebración de manera concertada de diferentes eventos, seminarios y congresos sobre 'el estado del arte' y su futuro.

C. Fortalecimiento de los programas de entrenamiento, capacitación y fomento a la colaboración interdisciplinaria entre los estudiantes de posgrado, a través de la celebración de talleres de solución de problemas planteados por la industria o por sectores gubernamentales, a través de alianzas con instituciones internacionales con probada experiencia en la materia.

D. Incentivación del quehacer científico y promoción de la investigación en ciencia básica de manera profesional, a través de los diferentes programas de divulgación científica entre los jóvenes de educación media y media superior, así como de la celebración de los diferentes talleres de ciencias.

E. Desarrollo de infraestructura y crecimiento del capital humano.

F. Fortalecimiento de los vínculos de colaboración científica entre los diferentes centros del sistema desde los que se llevan a cabo investigaciones en matemáticas puras y aplicadas, así como en ciencias de la computación.

Nuevos cauces

En los primeros años del Siglo XXI el CIMAT abrió una nueva línea de investigación en materia de Ingeniería de Software, a través de la contratación de un pequeño pero importante grupo de distinguidos investigadores jóvenes formados principalmente en Carnegie Mellon. Actualmente, esta línea continúa su curso en la Unidad Zacatecas del CIMAT.

En los últimos dos o tres años se dio una convergencia importante y muy interesante entre los grupos de álgebra (encabezado por el director del CIMAT, José Antonio de la Peña), de probabilidad (encabezado por el ex director del CIMAT, Víctor Pérez Abreu) y de topología (encabezado por el ex director del CIMAT, José Carlos Gómez Larrañaga). Dicha convergencia tuvo lugar primeramente a través del seminario institucional en teoría de gráficas, pero pronto derivó en un apoyo especial para formar nuevos cuadros de investigación en el área de análisis topológico de datos (TDA, por sus siglas en inglés) con recursos destinados expresamente para desarrollar dicha línea dentro de la institución.

De la misma manera, ha habido incursiones institucionales recientes en el área de supercómputo y cómputo distribuido con una significativa inversión de fondos gubernamentales para enlazar entre sí a las principales instituciones de investigación y de educación superior del Estado de Guanajuato y formar un *'back bone'* cuyo *'centro neuronal'* está ubicado en el Puerto Interior del Estado. Entre las instituciones enlazadas en este proyecto llevado a cabo bajo el liderazgo del CIMAT están, el Langebio del CINVESTAV en Irapuato, el Instituto de Física de la Universidad de Guanajuato en León, los CPI's CIO y CIATEC en León y el CIMAT en Guanajuato.

Además de este proyecto, hay otro programa interinstitucional que se está llevando a cabo en el Estado de Yucatán, también realizado bajo el liderazgo del CIMAT, con dos objetivos centrales. El primero es la creación de un repositorio nacional de imágenes satelitales que inicialmente se desarrolla en colaboración con la Agencia Espacial Mexicana y que a mediano plazo busca convertirse en un repositorio y centro de respaldo de las principales bases de datos de las diferentes agencias y entidades gubernamentales, dentro de las que se encuentran el INEGI, la CONABIO y la Secretaría de Marina, entre otras. El otro objetivo consiste en generar "espejos" en diferentes lugares de la República Mexicana para respaldar estas bases de datos, así como el desarrollo de diferentes centros de procesamiento eficiente de estas fuentes de información, el primero de los cuales estaría ubicado en el Parque Científico y Tecnológico de Yucatán (PCTY), sitio que ya es sede de al menos dos centros CONACYT que se encuentran allí operando (CICY y CIATEJ) y será sede de instituciones como el CIMAT (iniciando operaciones en el PCTY en septiembre de 2015), la UNAM (con una representación inicial del IIMAS), la UADY y el CINVESTAV.

El IPICYT cuenta además con un laboratorio nacional, el Centro Nacional de Supercómputo. Este laboratorio ofrece supercomputadoras a todo científico mexicano o extranjero, adscrito a instituciones nacionales en forma gratuita. Uno de los grupos de investigación que usa esos recursos es el que modela por los métodos de computación más avanzados las propiedades magnéticas de nanoestructuras mono y bimetalicas. Existe el proyecto de convertir este centro en un Centro de Supercómputo Binacional México-Estados Unidos. La propuesta del lado mexicano es contar con un equipo con un rendimiento de al menos un petaflop. Esta infraestructura beneficiaría a todos los investigadores de las diferentes áreas del conocimiento con requerimientos de cómputo masivo, como son los astrónomos y los geofísicos, entre otros.

6.6 Tecnologías para la exploración científica

La instrumentación para la exploración de la naturaleza del Universo se desarrolla principalmente en el INAOE, el CIO, el CIDESI y el CICESE. En el INAOE se desarrolla i) óptica astronómica de diámetros grandes y de alta precisión; ii) optomecánica; iii) criogenia para aplicaciones en longitudes de onda del visible a milimétricas i.e. de 100K de 250 mK; iv) sensores de ondas milimétricas semi y superconductores; v) materiales a usarse como filtros selectivos de frecuencia; vi) electrónica semiconductor para lectura de detectores; vii) caracterización de detectores milimétricos; viii) control avanzado; ix) análisis de imágenes.

En el CIO se desarrolla asimismo óptica de alta precisión y se cuenta con equipo moderno para el depósito de películas delgadas que optimizan la transmitancia de los elementos ópticos de instrumentos astronómicos. Adicionalmente este equipo se usa para el depósito de películas en materiales avanzados.

El CIDESI está especializado en diversos aspectos de la mecánica. De cara al desarrollo de instrumentos astronómicos su aportación es muy importante ya que permite realizar entre otros procesos: i) simulación numérica de sistemas mecánicos; ii) análisis de confiabilidad en componentes de alta precisión y en operación extrema de acuerdo a estándares aeroespaciales; iii) simulación de fenómenos térmicos y diseño de sistemas criogénicos; análisis experimental del comportamiento mecánico de componentes incluidos esfuerzo, deformación y vibración; v) diseño de sistemas mecánicos de alta precisión; vi) diseño estructural complejo y de alta especificación; vii) ingeniería de materiales de aplicación aeroespacial; viii) procesos de manufactura de carácter aeroespacial incluyendo mecanizado y soldadura; ix) técnicas de inspección, alineación y montaje; x) administración y gestión de proyectos científicos y aeroespaciales.

En el CICESE se desarrolla investigación en microscopía y espectroscopía no lineal con un gran potencial de investigación multidisciplinaria, aplicada al área de la microbiología, en la cual el microscopio es una herramienta de trabajo. Se explora el uso de microscopía no-lineal en el estudio de los mecanismos celulares y moleculares asociados al crecimiento apical polarizado del hongo filamentoso *Neurospora crassa*. En particular, para visualizar *in vivo* de una forma no invasiva, sin marcadores fluorescentes, y no destructiva, el tráfico de las vesículas secretoras y otros componentes celulares que determinan el crecimiento y la morfología de estos especímenes.

Existe una alianza estratégica formal entre el INAOE y el CIO para la fabricación de óptica de alta precisión que ha permitido participar en proyectos de instrumentación para los grandes telescopios que actualmente están funcionando. En particular para el espectrógrafo de nueva generación MEGARA, para el Gran Telescopio Canarias de 10.4m de diámetro y en el proyecto WEAVE para el telescopio William Herschel de 4.2m. Por otro lado se colabora con el CIDESI en cuestiones de optomecánica también de precisión. Asimismo existe una colaboración del INAOE y el CIDESI, junto con el Instituto de Astronomía de la UNAM, en el proyecto del telescopio óptico de 6.5m de

San Pedro Mártir.

En la siguiente matriz se muestran como ejemplo en materia aeroespacial y de astronomía la interacción natural de los centros para tecnologías específicas relacionadas con los temas de su especialidad, que abordarían proyectos de desarrollo de instrumentación, equipo o sistemas para investigación de frontera. Cabe resaltar que las tecnologías citadas tienen una amplia aplicación industrial y pueden ser transferidas a las empresas de las ramas automotriz, aeronáutica y metalmeccánica, por citar solo algunas.

		Instrumentos astronómicos	Satélites	Telescopios robóticos	Robots terrestres	Robots submarinos	Equipos alto vacío	Equipos de microscopía y análisis
Temas	Electrónica	INAOE/CIDESI/CICESE						
	Software	INAOE/CIDESI/CICESE/ CIMAT						
	Optica	INAOE/CIO/CICESE						
	Sensores	INAOE/CIDESI/CICESE/CIO						
	Control	INAOE/CIDESI/CICESE/IPICYT						
	Materiales	CIMAV/IPICYT						
	Mecánica	INAOE/CIDESI						
	Recubrimientos	CIDESI/CIMAV						
	Manufactura	CIDESI						
	Vision e imágenes	INAOE/CIDESI/CICESE/CIO						
	Matemáticas	CIMAT						

7. Plan de implementación

7.1 Ruta crítica para abordar los temas

7.1.1 Colaboraciones a futuro

Las colaboraciones son inherentes a la investigación científica y tecnológica, enriquecen el quehacer científico, especialmente en las ciencias fisicomatemáticas y de la Tierra, donde es difícil, si no imposible, alcanzar la masa crítica o la concentración de conocimiento para abordar casi cualquier tema en la mayoría de los centros de investigación a nivel nacional e internacional. Además, la necesidad de construir y mantener grandes instalaciones en ciencias experimentales, observacionales y computacionales conlleva la necesidad de conformar grandes consorcios para financiarlas y operarlas.

A nivel nacional es prioritario fortalecer las actuales redes científicas que han probado ser exitosas o tienen carácter estratégico para impulsar el bienestar de los ciudadanos, e impulsar otras, como la de centros CONACYT, que potencialmente aumentarán el retorno científico. Por ejemplo, fusionando las capacidades de los diferentes centros en los temas de diseño, manufactura, materiales, óptica, software y electrónica, entre otros, se pueden ofertar soluciones tecnológicas de vanguardia que proporcionen insumos para impulsar el conocimiento de frontera básico sobre la

naturaleza del Universo, con potenciales derramas tecnológicas y otras aplicaciones a ciencias afines.

Las colaboraciones internacionales se ven desde un punto de vista estratégico muy ligadas a la proximidad de México al gran motor de la ciencia mundial que es EUA. Muchos de los investigadores mexicanos han hecho parte de sus estudios ahí y muchos otros cuentan con proyectos comunes y colaboradores estadounidenses. Existen lazos formales entre instituciones con laboratorios u observatorios de carácter binacional. Ejemplos concretos son los observatorios binacionales entre México y Estados Unidos GTM y HAWC, que operan en el INAOE y la propuesta del Centro Binacional México-Estados Unidos de Supercómputo. También se cuenta con fuertes lazos con los países de la Unión Europea. Estos contactos se deben seguir fortaleciendo y además procurar la vinculación con otros países fuertes del campo como Canadá, Japón, Corea, sin dejar de lado a la potencia científica emergente China.

En este sentido, el futuro planteado pasa por implantar una fuerte base científica de carácter experimental/observacional en los centros CONACYT y vincularla a redes nacionales e internacionales del mismo carácter. En particular se deben fortalecer, actualizar constantemente y optimizar la explotación científica de los centros de supercómputo y bases de datos existentes y planeadas, que tienen aplicaciones diversas; la infraestructura astronómica multipropósito GTM, HAWC, GTC, OAGH, y consolidar el proyecto TSPM6.5m, sin descuidar experimentos dedicados a problemática muy concreta tratada por grupos más pequeños, como Sci-HI, o nuevas vías de desarrollo para colaboración internacional como WEAVE y WSO, entre otros; fortalecer las redes geofísicas de observación existentes y la creación de laboratorios especializados para análisis y procesamiento de datos de las mismas; desarrollar la infraestructura que permita realizar avances en nanofotónica, metamateriales ópticos, láseres de pulsos ultracortos y ultraintensos, y óptica cuántica, entre otros.

En la sección 7.8.1 se da una lista exhaustiva de infraestructura clave de envergadura para este PILA.

Se deben además, mantener y abrir nuevas líneas de investigación específicas, tanto teóricas como experimentales.

7.1.2 Política para tener mayor productividad e impacto

Actualmente los centros CONACYT cuentan con grupos de investigación que abordan estudios sobre la naturaleza del Universo, colaboran con grupos líderes de otros países, publican sus resultados en revistas de circulación internacional de los más altos estándares y diseminan ese conocimiento a la sociedad a través de los gabinetes de prensa de sus centros. Sin embargo, esta labor científico-tecnológica de los centros se potenciaría si se solventaran algunos aspectos críticos.

Además de la necesidad de una creación significativa y sostenida de plazas que permitan un crecimiento acelerado de la planta académica y que la mantenga en un estado de actualidad sano y competitivo, se recomienda tomar medidas inmediatas para corregir y reorientar la siguiente política de desarrollo científico y tecnológico del país:

- a) **Fortalecer los actuales equipos científicos, liberándolos de trabas burocráticas:** se debe financiar la mejor ciencia; evitar limitantes actuales como, por ejemplo, la restricción de un solo proyecto por investigador por convocatoria; y flexibilizar el destino de los recursos asignados a proyectos de investigación, por ejemplo, la limitante de inversión en infraestructura, adquisición de equipo de cómputo, cambios de rubro de partidas presupuestales, solo por mencionar algunas de las limitantes más inmediatas. Además se deben facilitar los trámites de adquisición. Si un investigador de una universidad

estadounidense debe comprar una lente, por ejemplo, no le va a tomar más de un par de días tenerla en su laboratorio, en los centros CONACYT este proceso conlleva una espera de meses y a un precio muy superior al que se paga en el extranjero (por la demora, aranceles e intermediarios). En los laboratorios se necesitan componentes con características muy específicas, y es imposible planear con detalle tiempos, plazos, características concretas o mantener un stock con todas las posibilidades. La flexibilidad en el ejercicio de los recursos es clave.

- b) **Privilegiar la participación de los grupos de investigación mexicanos en proyectos internacionales competitivos:** participar en programas de financiamientos compartidos en proyectos científicos de vanguardia; impulsar la vinculación y colaboración de los grupos nacionales con los mejores grupos de investigación a nivel internacional en los proyectos más avanzados.
- c) **Modernizar y mantener actualizada la infraestructura existente:** mantener condiciones óptimas de operación en laboratorios, observatorios, bancos de almacenamiento y respaldo de datos, centros de procesamiento de datos, entre otros: invertir en la infraestructura necesaria; crear más laboratorios nacionales y multinacionales, así como liberar la restricción de que exista un solo laboratorio nacional en el país de cada especialidad; liberar las actuales restricciones de adquisición de equipo e inversión en infraestructura; destinar cantidades realistas de recursos para la apertura de nuevos laboratorios; contar con recursos destinados a programas permanentes de mantenimiento de equipo e infraestructura, así como al remplazo del equipo obsoleto.
- d) **Crear canales de financiación para el establecimiento de nuevos laboratorios y construcción de instrumentos científicos:** faltan convocatorias donde los grupos de investigadores puedan competir por partidas que van desde los 200.000 a los ~2 millones de dólares. Un ejemplo común es el de un investigador joven que intenta establecer una nueva línea de investigación. Para montar un laboratorio se requiere de, al menos, 200.000 dólares. La experiencia nos dice que en los centros un investigador tarda entre 10 y 15 años en establecer un laboratorio medianamente competitivo. Es decir que estamos desperdiciando la que normalmente es la etapa más productiva de un investigador. Otro caso sería el que implica la construcción o compra de equipo mayor, entre medio millón y 5 millones de dólares, como pueden ser instrumentos astronómicos, microscopios especializados, sistemas de cómputo distribuido, grandes equipos de almacenamiento y respaldo de datos, láseres de alta potencia o equipos de nanofabricación y nanocaracterización, entre otros. No existen convocatorias en las que un equipo científico pueda presentar estos proyectos.
- e) **Flexibilizar las políticas de contribuciones internacionales en laboratorios nacionales y programas de posgrado:** actualmente hay requerimientos en las convocatorias, en las solicitudes de financiamiento o en los criterios de evaluación de proyectos o de programas docentes a seguir por los evaluadores de las propuestas. Por ejemplo, aparecen requerimientos de contribuciones internacionales que no solo pueden ser difíciles de satisfacer, sino para los que quizá no exista justificación para hacerlos. En particular, los centros CONACYT, de manera individual, pueden tener grandes dificultades en *negociar a priori* inversiones, financiamientos o contribuciones internacionales para el desarrollo de nueva infraestructura o equipamiento. En prácticamente todos los casos observados de financiamientos internacionales obtenidos, el gestor ha sido el CONACYT mismo y normalmente las negociaciones han tomado tiempos que han ido más allá de los plazos de las convocatorias. Similarmente, los financiamientos internacionales directos a programas de posgrado nacionales son prácticamente inobservables y su ausencia puede no tener nada que ver con el nivel internacional mantenido por dichos programas.

- f) **Equiparar el nivel de financiación de la ciencia desarrollada en los centros con la de las universidades:** los centros están en una gran desventaja respecto a los grupos de investigación de las universidades, que tienen acceso directo a otras fuentes de financiamiento propio. Para subsanar esta desventaja se necesitarían recursos exclusivos para proyectos de investigación de centros CONACYT a corto y mediano plazo.
- g) **Establecer un programa robusto de plazas postdoctorales:** revisar y actualizar los estatutos de personal académico de los centros que aún no cuentan con reglamentación ni política en materia de contrataciones posdoctorales; destinar recursos regularizados para mantener, de manera robusta y sostenida, año con año, una amplia planta de investigadores en régimen posdoctoral en condiciones competitivas; liberar las restricciones postdoctorales impuestas por las bases de las convocatorias de PNPC, proyectos de ciencia básica y de fondos sectoriales; generar programas de intercambio, movilidad y contratación temporal de egresados y graduados de los programas de doctorado, tipo UC-Mexus, entre los centros CONACYT. El tema de los postdocs no era probablemente muy relevante cuando iniciaron los centros; las exigencias y las perspectivas eran distintas y había plazas para contratar jóvenes recién egresados. Aunque los reglamentos académicos han evolucionado a través de los años, adaptándose a las nuevas exigencias de la institución, no ha habido cambios significativos en lo que respecta a este tipo de plazas. Estamos muy lejos de las cotas estándares de países líderes en los que típicamente cada investigador profesor consolidado mantiene un par de postdocs asociados.
- h) **Revisar los criterios para la evaluación y promoción de los grupos instrumentistas:** se debe identificar el perfil del científico instrumentista y promover la creación de plazas para dicho perfil. Es prácticamente imposible competir favorablemente por una plaza de investigador si la formación y experiencia es en desarrollo tecnológico, ya que el criterio básico siempre es el del número de publicaciones. En consecuencia es muy difícil consolidar grupos de instrumentación científica en centros de investigación básica.
- i) **Diversificar las líneas de investigación** en todas las ciencias mediante la creación robusta y sostenida, por al menos 10-15 años, de nuevas plazas para investigadores jóvenes y plazas para reforzar los actuales grupos de investigación consolidados: mantener una política decidida encaminada a incrementar significativamente el número de investigadores; mantener programas de creación de nuevas plazas en nuevas líneas de investigación sin trayectoria previa en el país.
- j) **Implementar un programa de visitantes científicos** de alto prestigio: competir y desarrollar las últimas hipótesis o ideas científicas se facilita enormemente si es posible atraer en estancias de mediana duración, de unos meses, a los mejores expertos de esas áreas trabajando al lado de los investigadores locales.
- k) **Fomentar la organización de talleres y otros eventos académicos** que permitan crear vínculos con otros grupos de investigación y con otros centros: mantener programas robustos de financiación de eventos; fortalecer las alianzas internacionales tipo ICTP, PIMS, BIRS, entre otras.
- l) **Contar con programas de movilidad académica** flexibles para fomentar intercambio de conocimiento y de ideas: flexibilizar los Estatutos de Personal Académico para fomentar movilidad entre los centros.
- m) **Fortalecer la formación de recursos humanos especializados:** incentivar los intercambios con instituciones de prestigio internacional; resaltar los programas de

posgrado duales o en colaboración con instituciones de prestigio internacional; incrementar las actividades de promoción de vocaciones científicas en el nivel escolar medio; ejemplo: los clubes de ciencias y los talleres de ciencias para jóvenes.

- n) **Generar mecanismos que optimicen la comunicación entre los diferentes centros:** destinar fondos para mejorar la conectividad y mantener programas de seminarios, conferencias y docencia a distancia; privilegiar programas que compartan infraestructura de gran calado.
- o) **Crear bolsas con fondos suficientes para operación y mantenimiento de redes de instrumentos:** es importante destinar fondos que permitan la operación de redes instrumentales de manera continua, como es el caso de las redes de monitoreo. La falta de recursos en este rubro genera en muchas ocasiones que se pierdan datos muy preciados e irrecuperables.

Conviene hacer hincapié en tres de los puntos anteriores que resultan fundamentales para la consecución de metas importantes y para observar cambios significativos a mediano plazo que cierren las grandes brechas que tenemos con respecto a otros países. A saber, el punto del preámbulo referente a contar con una decidida disponibilidad de nuevas plazas para el crecimiento, renovación y sana actualización de la planta académica del país, el punto relativo a las plazas posdoctorales y el punto relativo a los programas de investigadores visitantes.

Las plazas posdoctorales temporales, de dos a cuatro años de duración garantizada, son imperiosas; tanto para el desarrollo de nuevas líneas como para el rápido avance de cualquier temática establecida. Los institutos en la primera línea de investigación del mundo tienden a tener más posiciones posdoctorales que posiciones permanentes. Los ejemplos abundan; el más famoso es el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton (IAS). Su estructura descansa básicamente sobre una planta de unos doscientos jóvenes talentosos en régimen de estancia posdoctoral que son guiados por una planta académica base de alrededor de treinta prestigiosos investigadores divididos en cuatro concentraciones de especialidad: historia, matemáticas, ciencias naturales y ciencias sociales. Dentro de esta planta académica base han estado personalidades como Albert Einstein, Kurt Gödel, J. Robert Oppenheimer y John von Neumann, entre otros. El IAS mantiene también un robusto programa continuo de distinguidos visitantes que imparten talleres y conferencias especializadas.

El citado ejemplo del IAS enseña que competir en, y desarrollar las, teorías o ideas científicas de actualidad se privilegia enormemente si es posible tener por un tiempo a los mejores expertos y especialistas de las diversas áreas del conocimiento, trabajando al lado de los investigadores locales y de los jóvenes posdoctorantes. Resulta entonces fundamental contar con un plan robusto y permanente de visitantes científicos de primer nivel. Lo anterior, sin dejar de lado que es necesario el contratar de manera sostenida y continua a nuevos investigadores; tanto jóvenes como consolidados, que aporten nuevas ideas y conexiones y mantengan en continua renovación la planta científica y los temas mismos de investigación.

Mantener a un investigador de estas características a lo largo de un año en cada uno de los centros del PILA, a través de convocatorias, supondría unos 4.5 millones de pesos. Al igual que los postdocs, los visitantes refuerzan líneas emergentes o complementarias de investigación a las ya existentes en las instituciones, siendo su principal aportación y beneficio la incorporación de jóvenes investigadores a tales líneas de investigación.

La contratación de un postdoc competitivo a nivel internacional en las subdisciplinas de la Naturaleza del Universo fácilmente suponen un retorno de 2 a 3 publicaciones anuales de alto impacto adicionales al grupo, dependiendo de la subdisciplina de trabajo, y la ampliación de líneas

de investigación en el caso de la incorporación de investigadores jóvenes procedentes de grupos con los que no se ha mantenido trabajo previo.

Teniendo en cuenta que este PILA tiene un alcance de unos 300 investigadores del sistema de centros, y que aproximadamente la mitad se pueden considerar investigadores consolidados, mantener convocatorias abiertas que permitan asociarles 2 posdocs anualmente supondría una inversión de unos 90 millones de pesos, tasas médicas y prestaciones sociales a parte. Un programa de plazas postdoctorales así, abierta a todas las subdisciplinas, sin restricciones de tiempos de graduación, procedencia o destino del recién graduado, permitiría además hacer una selección más competitiva de candidatos para ocupar las cátedras CONACYT y plazas abiertas en instituciones académicas y de educación superior en el país, además de ayudar a la propia trayectoria de los candidatos al ser capaces de realizar investigación sin cargas administrativas, docentes o institucionales.

7.1.3 Propuesta de cohesión, comunicación y acción entre los centros

La interacción entre centros debe ser maximizada. Se reconoce que en la actualidad a pesar de haber temática modular común en varios centros, por ejemplo, en el de interacción luz-materia en CICESE, CIO, INAOE, aún no existe suficiente colaboración y comunicación. Existen vínculos formales entre CIO e INAOE para la construcción de óptica astronómica, pero esta alianza es una de las pocas colaboraciones formalizadas. También hay una conexión ya iniciada a través del módulo 6 de Tecnologías para la exploración científica entre CIDESI, CIO, INAOE, y a través de este PILA se prevé su expansión al CICESE. Potencialmente también la debería haber con el módulo 5 de El lenguaje del Universo, muy especialmente en lo referente a bancos y minería de datos, que tiene incidencia directa en los módulos 1,2,3 y 4. Falta conocimiento de la labor realizada en otros centros. Una iniciativa de inserción de pláticas de integrantes destacados dentro de los ciclos de seminarios institucionales sería deseable para apuntalar estas iniciativas y generar otras.

Los centros además pueden cohesionarse en torno a proyectos específicos de gran envergadura que requieran infraestructura existente en otros centros. Para conocer la infraestructura de otros centros se propone la creación de un inventario, cuyo acceso sea público, de los instrumentos principales de cada centro. Lo anterior contribuiría a promover la interacción entre miembros de distintos centros y promovería que estudiantes realizaran estadías fuera de su institución.

Políticas seguidas en países desarrollados para propiciar y fomentar incrementos significativos en la interacción y la colaboración científica entre personal de diferentes instituciones han comenzado por destinar importantes cantidades de recursos para mantener siempre activa una gran movilidad académica a través de la celebración de encuentros científicos, series de conferencias, seminarios conjuntos, entre otras actividades., bajo un liderazgo académico de reconocido prestigio. Aprovechando el desarrollo de las telecomunicaciones y el reciente impulso que en materia legal se les ha conferido en México, una parte de los recursos destinados a fomentar la interacción entre centros podrían invertirse en actualizar y mejorar el funcionamiento de los enlaces por videoconferencia, en laboratorios, salones de clase y pizarrones inteligentes, etcétera, sin dejar de lado, por supuesto, la inversión en movilidad física.

En la actualidad, la movilidad existente en el país se realiza primordialmente gracias a los recursos obtenidos por vía de los proyectos de investigación individuales de ciencia básica. Se reconocen y agradecen los esfuerzos realizados desde el CONACYT por integrar las redes temáticas y PILAs como éste. Sin embargo, las intenciones de estas políticas deben reforzarse debidamente con mayores recursos; además de lo mencionado en el párrafo anterior, se deben destinar recursos que reconozcan las responsabilidades de las instituciones o de los científicos que llevarán a cabo el liderazgo de dichas actividades.

7.1.4 Incidencia en laboratorios nacionales y multinacionales.

Existen varias iniciativas encabezadas por centros CONACYT vinculadas a este PILA que son y/o podrían convertirse en laboratorios nacionales o multinacionales.

El IPICYT cuenta con 2 laboratorios nacionales: a) el Laboratorio Nacional de Investigaciones en Nanociencias y Nanotecnología (*LINAN*), que se especializa en el estudio de materiales y brinda apoyo a los institutos de investigación, universidades, institutos tecnológicos y empresas del país, impulsando la investigación y desarrollo de la nanotecnología en México; y b) el Centro Nacional de Supercómputo (CNS), laboratorio líder a nivel regional, con presencia nacional e internacional, dedicado a proveer soluciones tecnológicas integrales personalizadas en supercómputo, informática y redes, con capacidad para desarrollar proyectos de alto impacto científico apoyado de infraestructura de vanguardia. El IPICYT encabeza, además, el Proyecto de Centro Binacional de Supercómputo México-Estados Unidos, en el cual el Centro Nacional de Supercómputo sería el socio mexicano y el *Texas Advanced Computer Center* sería el socio en EUA. Este proyecto plantea la adquisición de una supercomputadora con un rendimiento de un petaflop (10^{15}).

Recientemente, bajo iniciativas conjuntas e individuales del CIMAT, CentroGeo, INFOTEC y CIDE, se busca incidir en los alcances actuales de algunos Laboratorios Nacionales, como el de Política Pública, así como crear y desarrollar nuevos Laboratorios Nacionales como el de Geo-Inteligencia, o el Repositorio Nacional de Datos e Imágenes Satelitales. Existen multitud de ejemplos de la aplicación de la matemática a la solución de problemas sociales, como por ejemplo, en materia electoral, o en el entendimiento de la diseminación y transmisión de información en redes sociales. También se tratan problemas que atienden la optimización de tiempo y de recursos en, por ejemplo, salas de urgencias de un hospital, o en juzgados donde han de celebrarse juicios orales. En estos problemas se recurre a la aplicación de modelos matemáticos y a la simulación de los comportamientos esperados variando condicionantes iniciales o de acotamiento real al que están sujetos este tipo de problemas en una situación particular, y tienen una incidencia inmediata e importante en los tomadores de decisiones o en el diseño mismo de estrategias para saber cuáles han de ser los niveles óptimos o más seguros de gestión.

La comunidad óptica ha planteado la creación de una red de biofotónica, así como el establecimiento de subsedes regionales del Laboratorio Nacional de Microscopía Avanzada.

Por otra parte, aunque formalmente ninguno de los observatorios astronómicos mencionados en la sección 6 son laboratorios nacionales, todos funcionan como tal. HAWC y GTM están solicitando su reconocimiento por CONACYT, resaltando que realmente son infraestructura binacional al servicio de la comunidad nacional. GTC y TSPM6.5 también son laboratorios tri/bi-nacionales, en el sentido de que toda la comunidad nacional tiene acceso a ellos por competencia de proyectos evaluados por pares.

7.2 Posibles fuentes de financiamiento

Fuentes nacionales: CONACYT

- Proyectos de ciencia básica
- Estudios de especialidad, maestría y doctorado en México
- Postdocs en el extranjero
- Sabáticos en México y en el extranjero

- Repatriaciones y retenciones
- Cátedras CONACYT
- Fondos sectoriales (SENER, SEP, SAGARPA, etc.)
- Fondos mixtos (todos los estados)
- Fondos regionales
- Apoyos complementarios
- Apoyo a infraestructura científica
- Cooperación Internacional
- Comunicación y divulgación de la ciencia

Otras organizaciones nacionales

- AMC (Academia Mexicana de Ciencias)
- ANUIES (Asociación Nacional de Universidades e Institutos de Educación Superior)
- INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático)
- PEMEX (Petróleos Mexicanos)
- CFE (Comisión Federal de Electricidad)

Fuentes Internacionales

- NSF (National Science Foundation)
- CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique)
- NSERC (Natural Science and Engineering Research Council of Canada)
- ERC (European Research Council)
- ESF (European Science Foundation)
- Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD)
- Fundación Alemana de Ciencias (DFG)
- CONAHEC (Consortium for North American Higher Education Collaboration)
- UC-MEXUS (The University of California Institute for Mexico and the United States)
- Bilaterales, SRE (Secretaría de Relaciones Exteriores)

Aunque el abanico de convocatorias es amplio, se ha venido observando una falta de incremento en los presupuestos dedicados al área de ciencias físico-matemáticas y ciencias de la Tierra, englobado en las convocatorias de ciencia básica, mientras que el número de investigadores de

estas disciplinas, si bien ha crecido moderadamente, definitivamente ha incrementado en madurez, impacto y reconocimiento en el medio científico internacional, por lo que los montos destinados en las convocatorias para financiar sus proyectos de investigación debería verse incrementados sin las limitaciones mencionadas en apartados anteriores y debería crecer mucho más en años sucesivos, tanto los financiamientos a los proyectos, como la generación de nuevas plazas.

Adicionalmente, el monto máximo de las convocatoria de grupo, limitado a 5M\$ para típicamente 4 años, es insuficiente para financiar proyectos que requieren la construcción de instrumentos científicos o adquisición de equipo, cuyos montos rondan los 2-3 millones de dólares, y ~20 millones de euros para los más complejos. Se nota una falta de convocatorias de montos intermedios entre los proyectos de grupo y los megaproyectos que ya empiezan en las decenas de millones de dólares.

El divorcio en convocatorias recientes entre proyectos de infraestructura y proyectos de ciencia básica limitando la componente de infraestructura a menos del 10% no favorece la creación de grupos interdisciplinarios que puedan crear nueva infraestructura desarrollada en casa y explotarla simultáneamente.

Otra propuesta consiste en la necesidad de incidir seriamente en que la iniciativa privada, a través de sus fundaciones u otros organismos, ayude a financiar cátedras que puedan concursarse abiertamente de manera internacional para la incorporación de científicos de renombre por periodos de tiempo cortos, de meses, a medianos de 1-2 años. Para ello tendríamos que desarrollar un plan de acción que, apoyado por el gobierno, les facilite involucrarse. Esto es un ejemplo de bajo coste dirigido a una comunidad, la empresarial, que no se ha destacado en México por una labor filantrópica hacia la ciencia. Por contraste en países como EUA los primeros telescopios ópticos de 10m llevan el nombre de la fundación privada que los financió sustancialmente, la *W.M. Keck Foundation*, con 70 millones de dólares en 1985.

7.3 Cómo se pretende involucrar a los receptores de la información

7.3.1 Comunidad científica nacional e internacional (se trata en el punto 7.4)

7.3.2 Comunidad estudiantil nacional

La manera directa para involucrar al sector educativo es a través de conferencias de expertos, ya sea en los planteles, o bien durante las visitas que estos grupos escolares realizan a los centros de investigación, o las organizadas por los estados en bibliotecas. Aún con la participación de la plantilla completa de investigadores, esto no resulta muy eficiente, aunque sigue siendo beneficioso para los estudiantes que entran en contacto con algún investigador.

El acercamiento a los diferentes niveles educativos se puede lograr de manera más eficiente a través de los profesores de primaria, secundaria y preparatoria. Se debe generar un programa de capacitación a través de talleres o diplomados. Ambos deben ser certificados por los centros de investigación. Los profesores capacitados, y certificados, se pueden volver capacitadores (“embajadores”, “mensajeros”, etc.), de generaciones subsecuentes de profesores, además de transmitir el conocimiento del módulo a los estudiantes de sus grupos.

Se debe generar un temario para la enseñanza de “La naturaleza del Universo”. El CICESE, CIMAT e INAOE ya tiene experiencia en este aspecto con talleres de ciencia dirigidos a profesores de primaria, secundaria y preparatoria. Como ejemplo, a los del INAOE han asistido más de 300 profesores de todos los estados. Incluye conferencias, talleres, visitas a laboratorios de astrofísica, óptica, electrónica y ciencias computacionales, pero también se realizan otras actividades en áreas

como química y biología. Se pretende fomentar que la oferta académica de las escuelas sea más amplia, incluyendo actividades científicas extracurriculares atractivas, y hasta lúdicas.

Para nivel básico, de preescolar a secundaria, existe el llamado Programa de Fortalecimiento para la Calidad en Educación Básica. Antes se conocía como el Programa Nacional de Lectura (PNL) y se ha colaborado intensamente con las sedes de diferentes estados. El programa tiene un gran alcance y el objetivo es establecer comunicación con el programa a nivel federal, lo que implicaría mayor impacto en el sector educativo, ahora desde otro flanco.

Otro espacio ideal para difundir el conocimiento del Universo es a través de los Encuentros de profesores de Ciencias Naturales que coordina la Academia Mexicana de Profesores de Ciencias Naturales. Hay encuentros nacionales y regionales, que deberían contar con mayor difusión y mayor presupuesto para realizar todas las actividades que típicamente se pretenden desarrollar.

A pesar de la enorme y lenta maquinaria de la SEP se les debe presentar una propuesta de acercamiento del conocimiento del módulo a nivel general o bien a través de los diferentes sistemas o subsistemas existentes. Para el nivel de primaria existen las Primarias Generales y las Primarias Indígenas. A nivel secundaria, las Secundarias Generales, las Técnicas y las Telesecundarias.

Muchos centros como CICESE, CIMAT, IPICYT e INAOE, entre otros, mantienen contacto con casi todas las modalidades locales de instituciones dedicadas a la educación media superior, ya sea en preparatorias afiliadas a universidades, Colegios de Bachilleres, CECYTEs y CBTis, entre otros. Se cuenta y se deben reforzar colaboraciones directas con ellos y otros aliados locales. El ejemplo del programa INAOE-BUAP-Victorinox "Del Aula al Universo", que dota de telescopios a escuelas y entrena a sus clubs de ciencia, es un botón de muestra de estos esfuerzos.

Adicionalmente se debería colaborar bajo consultoría concertada entre SEP y CONACYT en la confección y revisión de los contenidos de ciencia de los Libros de Texto Gratuitos. La Comisión Nacional de Texto Gratuito edita y publica los libros de texto para preescolar, primaria, secundaria, telesecundaria, indígena (42 lenguas), Braille y Macrotipo con una impresión propia aproximada de 25 millones de ejemplares, el resto, hasta 200 millones, es obtenido bajo licitación a empresas privadas. La oportunidad es dual, tanto en lo relacionado con la difusión informada de la ciencia y la tecnología en la edad temprana de la educación, como en contraprestaciones económicas por dichos servicios, con incentivos institucionales y personales para los participantes.

Por muchos años centros como el CICESE, CIMAT e INAOE se han preocupado por mantener activos sus talleres de ciencias para jóvenes y sus programas de difusión y divulgación científica, las actividades de "Matemorfosis", por ejemplo, aunque lo han venido haciendo siempre con grandes dificultades para buscar y encontrar los recursos que se destinan a la celebración de dichos talleres y mantenimiento de dichos programas. El gran beneficio es que estos esfuerzos han creado una extensa red de "ex-alumnos" que pueden servir, igual que los profesores mencionados antes, de "embajadores" en sus actuales instituciones. Generar talleres y programas divulgación de este tipo en cada centro de investigación con intercambio de experiencias y material didáctico sobre La naturaleza del Universo sería uno de los logros de la PILA.

7.3.3 Comunidad empresarial nacional

Con el desarrollo de proyectos de instrumentación científica de envergadura se fortalece el conocimiento tecnológico, de tal manera que se pueda usar para aplicaciones industriales. En particular, el desarrollo de instrumentación astronómica lleva a los límites el diseño óptico, optomecánico y de manufactura, entre otros, pues son sistemas de alta precisión que operan en condiciones extremas de alta o baja temperatura. Además, investigaciones teórico-experimentales en la interacción luz-materia y la naturaleza de la materia tienen un uso tecnológico potencial en

las industrias de grabación magnética, energía y óptica. El CIMAV y CIDESI son los que más vinculaciones con la industria tienen entre los centros participantes.

Para fortalecer la transferencia del conocimiento a la industria y al sector público, se ha sugerido la creación de departamentos de vinculación y observatorios tecnológicos dentro de los centros CONACYT. Estos departamentos deben tener personal capacitado específicamente para tal propósito y buscan y facilitan el vínculo entre la investigación básica y aplicada con el sector productivo. Tales departamentos ya existen exitosamente en centros como el INAOE, donde el personal investigador especializado consulta al personal investigador correspondiente cuando necesita participación y asesoría de los mismos.

A continuación se describen algunas aplicaciones industriales:

- a) Sistemas de alto vacío:
 - a.1) Aplicación en sistemas de procesamiento en industria alimenticia.
 - a.2) Aplicación para el tratamiento térmico de partes de automóvil y maquinaria.
 - a.3) Aplicación en sistemas de procesamiento y empaque de medicamentos.
- b) Sistemas criogénicos:
 - b.1) Aplicación en las plantas petroquímicas.
 - b.2) Aplicación en el sector alimentos en procesadores, enfriadores y leofilizadores.
 - b.3) Aplicación en el sector farmacéutico para fabricación de medicamentos.
- c) Sistemas de visión y tratamiento de imágenes
 - c.1) Aplicación en la industria, automotriz, electrodomésticos, eléctrica, electrónica y de alimentos para la verificación de la calidad de los procesos y productos.
- d) Sistemas ópticos y láser: aplicación en diferentes ramas de la industria automotriz, electrodomésticos, eléctrica y electrónica para el procesamiento, verificación y manufactura.
- e) Fabricación de imanes permanentes para la industria automotriz y de aparatos domésticos.

La prestación y la contraprestación de servicios profesionales de información, opinión, investigación y desarrollo tecnológico es un área de oportunidad que tradicionalmente ha sido desaprovechada. Se deben incorporar estos servicios como fuentes de vinculación al sector empresarial.

7.3.4 Gubernamental

Algunas de las investigaciones del PILA tienen impacto inmediato en los planes de protección civil, por ejemplo estudios de sismicidad, vulcanismo y de generación de ciclones, entre otros. Los sectores privados y estatales que estén interesados en conocer los procesos de formación de recursos minerales y energéticos con valor económico pueden acceder información y bases de datos mediante el establecimiento de convenios de colaboración. Además, las investigaciones sobre Lenguaje del Universo tienen aplicación directa a cualquier sector gubernamental que requiera de almacenamiento y minería de datos para la consecución de proyectos de política pública.

Actualmente existen varios receptores de información:

- a) Sistema Nacional de Alerta de Tsunamis: recibe datos en tiempo real de la Red Mareográfica del CICESE.
- b) Pemex: Oceanografía del Golfo de México a través de contratos desde 2007.
- c) Secretaría de Energía: escenarios de derrames en el Golfo de México a partir de 2015.
- d) Servicio Sismológico Nacional: recibe datos en tiempo real de las redes sismológicas del CICESE (RESNOM y RESBAN).
- e) Servicio Meteorológico Nacional, Conagua e Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agrícolas y Pecuarias: pronóstico numérico del estado del tiempo y del clima.
- f) Red de Alerta Temprana de Inundaciones en la región sureste del país: vinculada a la propuesta de creación del Laboratorio Nacional de Análisis y Procesamiento de Imágenes Satelitales y del Repositorio Nacional de Imágenes Satelitales del CIMAT en colaboración con la Agencia Espacial Mexicana y auspicio del SIIDETEX-PCTYUC.

7.3.5 Público general

Se ofrecen servicios regulares de información al público, a través de páginas web, redes sociales, boletines y otras publicaciones en convenio con la prensa nacional sobre: (1) variables ambientales, (2) nivel del mar, (3) pronóstico meteorológico, (4) pronóstico climatológico, (5) predicción de corrientes en el Golfo de California, (6) sismicidad de la región noroeste de México, (6) efemérides astronómicas.

La manera más directa de encontrarse con el público en general y transmitir el conocimiento sobre La naturaleza del Universo, es, nuevamente, a través de conferencias en diversos foros. Muchas instituciones cuentan con series de conferencias permanentes. Sin embargo, el impacto depende de la capacidad de convocatoria, promoción en medios, así como de la ubicación y capacidad de la sede. Los programas que ha mantenido la Academia Mexicana de Ciencias, como el de “los domingos en la ciencia” solamente por citar un ejemplo, han sido particularmente importantes. Se reconoce que muchas instituciones cuentan con programas importantes de conferencias permanentes

En temas de matemáticas, por ejemplo, en los últimos años se han llevado a cabo esfuerzos conjuntos entre el Instituto de Matemáticas de la UNAM y el CIMAT para realizar, durante un fin de semana de marzo, la Feria de Matemáticas de Coyoacán, con conferencias de divulgación y ‘shows’ de magia, además de los talleres típicos de “simetrías y origami”, o “espejos, geometría y simetrías”, etc., enfocados al público en general.

En temas de astronomía y ciencias afines los planetarios y museos de ciencias han sido las sedes naturales y muchos de ellos programan series de conferencias de manera periódica. Sin embargo, creemos que se debe explotar la gran afluencia que tienen otros espacios menos relacionados con la ciencia, pero que a veces son más accesibles al público, tal es el caso de museos de arte, bibliotecas públicas y casas de cultura, entre otros..

Desde el INAOE se ha establecido una colaboración muy fructífera con el CONACULTA a través de sus diferentes programas, todos a nivel federal. Uno de ellos es el programa Alas y Raíces, que desde hace dos años ha incluido ciencia en sus actividades culturales para el público infantil. Otra es a través del Programa Nacional de Salas de Lectura, que cuenta con más de tres mil espacios de promoción de lectura a nivel nacional en los cuales podríamos tener presencia, no sólo a través de publicaciones, sino también de eventos. Es importante mencionar que estas salas funcionan mediante voluntariado y trabajo de la sociedad civil.

Los eventos masivos dan una dimensión amplificada de la divulgación, pudiendo atraer de miles a centenas de miles de participantes, como en:

a) *Noche de las Estrellas*. Desde 2009 la Noche de las Estrellas se ha convertido en el evento de divulgación científica más importante en nuestro país y quizá en Latinoamérica. Durante una noche, miles de personas se reúnen a observar el cielo en varias decenas de ciudades de todo el país. Además de observación astronómica, se tienen programas científico-culturales en todas las sedes que incluyen conferencias, música, danza, teatro y talleres, entre otras actividades. Las áreas de ciencia que se acercan al público son diversas, no sólo astronomía y física, se incluyen química, robótica, matemáticas, biología, electrónica y más. Sin embargo, el gran elemento a destacar son las más de 240 instituciones que participan anualmente en el evento y trabajan conjuntamente: instituciones científicas, de gobierno y culturales, planetarios, museos de ciencia, observatorios, universidades públicas y privadas, y desde luego, astrónomos profesionales y aficionados.

b) *Feria Internacional de Lectura (FILEC) y otras ferias*. Otro foro en que el acercamiento masivo a la ciencia ha sido muy exitoso es la FILEC, la única feria de ciencia y lectura que se organiza en un centro de investigación. Aunque este modelo es un poco más difícil de reproducir, una idea alterna sería integrar temas del Universo en otras ferias similares. En la FILIJ (Feria Internacional de Libro Infantil y Juvenil) se integró a la ciencia en su edición 2015. A esta feria llegan 360 mil visitantes.

c) *Mates en tu plaza*. Bajo el liderazgo del CIMAT y el grupo “Matemorfosis”, estudiantes de licenciatura y de los posgrados del CIMAT llevan a cabo jornadas de fines de semana con exposiciones, juegos y talleres en parques y plazas de diferentes localidades municipales y comunidades rurales del Estado de Guanajuato, principalmente.

7.4 Cómo se pretende involucrar a la comunidad académica nacional e internacional

La forma como se muestra la relación con otras instituciones tanto nacionales como extranjeras es a través de colaboraciones en la solución de problemas de interés común que se traducen en publicaciones en revistas científicas de primer nivel y las presentaciones de estos resultados tanto en congresos científicos nacionales e internacionales como en pláticas en otras instituciones. Ya se cuenta con una extensa y rica alianza con centros nacionales e internacionales de investigación, principalmente Estados Unidos y Unión Europea, detallada en la sección 10.

De especial relevancia son los congresos internacionales organizados en México, por la doble proyección de los grupos nacionales al exterior, y porque los investigadores extranjeros toman nota de las posibilidades de colaborar con grupos locales utilizando la infraestructura nacional. Estas actividades cuentan ya con una larga tradición en todos los módulos del PILA. En este contexto se enmarcan los congresos generados por la Unidad BIRS-CIMAT-UNAM en matemáticas, los congresos internacionales de geociencias encabezados por CICESE y la Universidad de Oregón, o los talleres internacionales avanzados Guillermo Haro organizados por el INAOE, por mencionar algunos ejemplos.

Por otra parte, la comunicación de los resultados más importantes en las páginas web institucionales puede ser muy efectiva, pero es necesario contar con personal de apoyo para obtener los mejores resultados. Una alianza entre las instituciones participantes en el estudio de la naturaleza del Universo podría ser un factor que realce el impacto académico de los centros a través de sus páginas web, con ligas entrelazadas entre los centros y noticias compartidas.

Otra forma de involucrar a los receptores académicos de la información requiere favorecer los intercambios académicos, apoyando estancias y sabáticos de nuestros investigadores y estancias de nuestros estudiantes en otros centros, nacionales y extranjeros, así como estancias y sabáticos de investigadores externos y estancias de sus estudiantes en nuestras instituciones. Son de especial interés para favorecer el intercambio de información y la formación de vínculos académicos las estancias posdoctorales de nuestros estudiantes graduados en otros centros de prestigio y las de doctores recientes procedentes de otras instituciones en nuestros centros. Es importante enfatizar que es necesario organizar reuniones de trabajo entre los centros CONACYT con intereses comunes para impulsar una mejor interconexión entre los centros y llegar a alianzas concretas en términos de movilidad.

Además, de cara a atraer colaboraciones internacionales e inversión extranjera en territorio mexicano, se debe seguir capitalizando el bono geofísico, que, por ejemplo, permite estudiar in situ fenómenos oceanográficos, sísmicos y volcánicos y ofrece montañas y parques naturales protegidos con características excepcionales para la observación astronómica, singulares a nivel mundial.

7.5 Plan de medios

Si bien el PILA está diseñado a diez años, en este plan de medios nos referimos únicamente al primer año e incluye tres etapas: la preparación, el pre-lanzamiento, el lanzamiento y la consolidación de mensajes clave. Esta estrategia se hará en coordinación con el comité de medios de la red de PILAs, poniendo a su disposición las experiencias aquí generadas e incorporando aquellas en las que otros PILAs tengan experiencias diferentes y enriquecedoras. Al final de estos doce meses se hará una evaluación del plan para realizar ajustes y modificaciones y plantear nuevas ideas y proyectos de comunicación en torno al PILA “Naturaleza del Universo”.

Objetivo

Difundir entre el público en general a través de distintos medios el programa del PILA “Naturaleza del Universo”, el cual articula las competencias de los centros CONACYT en las disciplinas de astronomía y cosmología, física, química, matemáticas y ciencias de la Tierra para avanzar el estado del conocimiento en esta materia de forma ordenada, y dar a conocer los avances científicos en estos temas.

Etapas del plan de medios

Meses 1 – 3. Preparación:

- a) Elaboración de los mensajes clave para dar a conocer el PILA.
- b) Identificación y nombramiento de voceros.
- c) Desarrollo de propuestas para eslogan y logotipo del PILA.
- d) Propuesta y definición de productos de comunicación a desarrollar durante el primer año, ya sea sobre logros y resultados científicos, que pueden ser atemporales y que no están necesariamente ligados a plazos determinados, como mensajes en redes sociales, o acerca de eventos con fechas específicas como talleres, conferencias, exposiciones, congresos, jornadas científicas, charlas o visitas, por mencionar algunas. Estos productos

de comunicación pueden ser: carteles, exposiciones, boletines, entrevistas, redes sociales, cápsulas de radio, folletos, fotografías, spots de televisión y radio.

- e) Micrositio: organizar un “hackathón” con comunicadores, diseñadores e informáticos de los centros, para el desarrollo de un proyecto multimedia para la Internet o de un micrositio interactivo y con descargables, que se pueda activar ese mismo día.
- f) Preparación de un listado de temas para la realización de artículos de divulgación a cargo de los científicos participantes en los módulos.

Meses 4 – 6. Pre-lanzamiento

Inicio de la campaña de expectativa. El objetivo es despertar el interés de los públicos potenciales de la PILA. A continuación presentamos algunas ideas:

- a) Video corto de uno o dos minutos, donde se relacione a cada uno de los centros con palabras claves, un término que los identifique y que nos refiera a otro centro, como un círculo.
- b) Spots de radio con duración de 20 segundos, que contengan información mínima, pero esencial, de las actividades que se desarrollarán en el PILA.
- c) Diseño de un BTL (*Below The Line*) que ayude a fortalecer la campaña de expectativa, acompañando al video y spots. Se realizará un diseño interactivo, dando a conocer cada uno de los módulos del PILA. Este BTL contempla el diseño de un llamativo producto de comunicación (prototipo) que puede ser en 2D y 3D, así como animaciones que se puedan publicar en las redes sociales.
- d) Difusión de los mensajes clave en las diferentes redes sociales de los centros participantes en el PILA.
- e) Identificar posibles medios aliados para obtener espacios permanentes para la divulgación de los temas del PILA.

Meses 7 – 9. Lanzamiento:

- a) Rueda de prensa a nivel nacional en las instalaciones del CONACYT, para la presentación del plan de trabajo del PILA y de cada uno de sus módulos.
- b) Ruedas de prensa en cada uno de los centros.
- c) Lanzamiento del primer boletín de prensa a medios nacionales y estatales.
- d) Video de presentación del PILA. Se puede ocupar como base el mismo de la campaña de expectativa.
- e) Entrevistas en medios informativos.
- f) Desarrollo de materiales audiovisuales y actividades para la Semana Nacional de Ciencia y Tecnología, si las fechas de la misma coinciden con nuestro lanzamiento.
- g) Inicio de transmisión de dos spots de audio y video por mes.
- h) Inicio de publicación de artículos de divulgación.
- i) Lanzamiento de un boletín de noticias y una publicación periódica de divulgación.

- j) Campaña en redes sociales.
- k) Concursos, primero dirigidos a la población estudiantil de cada uno de los centros del PILA, ofreciendo premios atractivos, con el fin de producir videoclips, cápsulas de radio, textos para un periódico o una página web, etc., abordando temas libres (o específicos) para su divulgación y difusión en medios masivos de comunicación.

Meses 10 – 12. Consolidación:

- a) Transmisión periódica de spots y cápsulas de audio y video.
- b) Publicación periódica de artículos.
- c) Publicación de un boletín informativo mensual.
- d) Aparición de los investigadores en medios de comunicación.
- e) Seguimiento en medios de comunicación.
- f) Presencia permanente en redes sociales para difusión y para efectos de retroalimentación.

Como se mencionó en párrafos anteriores, después de los primeros doce meses se hará una evaluación del plan y, con base en la misma, se desarrollarán nuevas propuestas de comunicación encaminadas a difundir el PILA. Para la consecución de este plan y cualquier plan a futuro, la participación de todos los centros CONACYT participantes será fundamental. Además se buscarán alianzas con los otros centros CONACYT a través del CADI (Consejo Asesor de Divulgación, Comunicación y Relaciones Públicas) de los Centros CONACYT y la Academia Mexicana de Ciencias

7.6 Plan de formación de recursos humanos

Existe una amplia gama de programas de maestría y doctorado en los centros del sistema CONACYT y prácticamente todos ellos ya cuentan con un amplio reconocimiento a nivel nacional y están muy bien calificados dentro del PNPC. La panorámica general es que, en el balance, el comportamiento de la matrícula de nuevo ingreso no ha dejado de presentar crecimientos muy mesurados de tipo lineal, esto es, como ya se ha explicado antes en otros rubros, sin incrementos significativos o acelerados que tiendan a cerrar brechas con respecto a lo que ocurre en otros países. En algunos casos, el comportamiento observado es que la matrícula de nuevo ingreso a algunos programas se mantiene constante.

La problemática es compleja. En la mayoría de los casos los programas de posgrado mejor calificados dentro del PNPC tienen un estándar mínimo bien establecido de requerimientos para la admisión que, en general, los aspirantes no están alcanzando. Esto evidencia una obvia deficiencia en la preparación profesional que algunos programas de licenciatura proporcionan a sus alumnos. Sin duda alguna resulta muy positivo detectar estas deficiencias al tomar “el pulso del país” en materia de formación de recursos humanos de nivel licenciatura. Sin embargo, no está en manos de los programas ofrecidos en los centros hacer algo eficaz para remediar este mal. Otro aspecto delicado es que, independientemente de los niveles de admisión e índices de rechazo en los programas de posgrado, tampoco se observan incrementos significativos en el número de aspirantes a los programas de posgrado. Sin incrementos en el número de aspirantes será muy difícil observar incrementos significativos en la matrícula de ingreso a los posgrados.

Hay un trabajo intensivo y muy robusto que tendría que realizarse desde los niveles más elementales de educación para promover el estudio de carreras científicas y hay un trabajo igualmente intensivo que hay que hacer para mejorar la calidad de la preparación que están recibiendo los egresados de algunos programas de licenciaturas en ciencias. En este momento se observa una cantidad importante de resultados paradójicos, puesto que hay programas de licenciatura muy bien calificados por las instancias correspondientes de evaluación y acreditación de la calidad (los llamados “CIES”) y cuyos egresados muestran grandes índices de rechazo a los programas de posgrado, mientras que hay programas de licenciatura mal calificados por los canales oficiales cuyos egresados están muy bien preparados. Un problema inmediato a atender es el de la homogeneización de los criterios de evaluación. Un mecanismo que podría ser útil es el de definir un padrón similar al PNPC para programas de licenciatura en ciencias e incentivar dichos programas con becas para los mejores estudiantes y con los mejores desempeños académicos, así como con financiamientos para la mejora de su infraestructura.

Las acciones que deben atacar el problema desde la formación básica de los estudiantes pueden tomar varios años. Sin embargo para paliar la inhomogeneidad de los estudiantes de nuevo ingreso a programas de posgrado se pueden ofrecer (ya algunos centros lo hacen) cursos propedéuticos durante el verano, previo al inicio del primer semestre. Este mecanismo ha mostrado ser útil para detectar alumnos con alta capacidad intelectual que no tuvieron la fortuna de llevar buenos cursos en la licenciatura.

En otros países (Israel fue un ejemplo desde los años 60) se realizó un trabajo importante por promocionar las ciencias en los niveles elementales de educación y por mejorar significativamente el desempeño de los estudiantes en ellas; principalmente en matemáticas. Una herencia directa de lo vivido en Israel han sido los talleres de ciencias para jóvenes de bachillerato que se organizan en muchas sedes educativas del país. Estos talleres comenzaron a mediados de la década de los 90 precisamente en el CIMAT y su promotor y organizador inicial fue el Dr. Gil Bor de nacionalidad israelí. Tratando de reproducir lo que él mismo vivió, le dio vida a estos talleres que, muy rápidamente, fueron adoptados por muchos centros del CONACYT. Entre los primeros se encontraron el INAOE y el CICESE; este último, en coalición con la UNAM y con la Universidad Autónoma de Baja California en su sede de Ensenada. Entre los más recientes que han incorporado dicho taller en sus planes anuales de actividades regulares se encuentra el ECOSUR. Hoy en día hay muchos ejemplos de alumnos que pasaron por estos talleres que cuentan con posdoctorados en “ciencias duras” y para quienes su paso por los talleres tuvo un efecto definitivo a la hora de decidir qué tipo de estudios profesionales seguir.

Como ejemplo conviene reseñar la experiencia del CIMAT. El CIMAT se planteó, dentro de sus objetivos estratégicos, reestructurar su vocación en la promoción de las ciencias matemáticas y en la formación de recursos humanos en matemáticas y ciencias de la computación. Desde el año 2000 se integró esta intención a uno de los tres programas estratégicos que inicialmente daban fundamento a sus actividades sustantivas. El programa de formación de recursos humanos “Búsqueda, captación, formación y retención de talentos matemáticos”. Dentro de dicho programa no solo se contempla la impartición de los programas de licenciatura, maestría y doctorado en matemáticas, probabilidad y estadística y ciencias de la computación, sino que también contempla la preparación precoz de jóvenes ubicados en los niveles de primaria, secundaria y preparatoria, a través de los diferentes talleres de ciencias y de matemáticas que, como se menciona en el párrafo anterior, desde 1994-1995 se imparten de forma ininterrumpida. Aunado a estos esfuerzos, desde hace casi cinco años también se imparten los cursos curriculares de matemáticas del nivel de preparatoria para los estudiantes más destacados y mejor motivados de la Escuela Preparatoria Oficial de la Universidad de Guanajuato. Además, desde hace casi cinco años también se echó a andar un robusto programa de difusión y divulgación de las matemáticas destinado a la popularización de la disciplina a través de métodos recreativos y llevados directamente a los principales centros de una gran cantidad de comunidades urbanas y rurales.

Los centros CONACYT realizan un gran esfuerzo en divulgación científica en todas las disciplinas del PILA y a todos los niveles (7.3.2, 7.3.5), lo que revierte indirectamente en la captación de estudiantes a los programas.

Sin embargo, el mayor problema en el comportamiento observado de la matrícula de nuevo ingreso y en el comportamiento observado de la eficiencia terminal de los programas de posgrado, es la falta de plazas de nueva creación para que investigadores jóvenes se incorporen a los grandes centros de producción de ciencia básica y aplicada o de producción de tecnología e innovación. Sin retos ni perspectivas atractivas en el horizonte, es muy difícil promover entre los jóvenes la aspiración por desarrollar una carrera en ciencia o en innovación tecnológica. Aquí vuelve a tocarse un punto que ya se ha mencionado antes: el de la renovación apropiada de las plantas académicas y el de la optimización de la producción de nueva ciencia y nuevas tecnologías. Volvemos a traer la atención hacia modelos del tipo del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton como un lugar para que los jóvenes investigadores, en sus mejores y quizá más creativos años, inviertan toda su energía en la producción de nueva ciencia y después, desde allí, aspirar a posiciones con vías a definitividad en otras instituciones públicas o privadas. En cualquier caso resulta fundamental no perder de vista la importancia de las plazas de tipo posdoctoral a la par de la creación de nuevas plazas para que jóvenes académicos se incorporen a los centros CONACYT.

Para terminar, y por el otro extremo, una fuente natural de nuevas plazas, es la de los investigadores jubilados. Resulta entonces igualmente importante contar con un plan atractivo de jubilaciones para los académicos para permitir que la renovación de la planta tenga la fluidez que necesita.

7.7 Plan de fortalecimiento de infraestructura

7.7.1 Infraestructura experimental/observacional

La infraestructura de laboratorios y observatorios debe ser actualizada constantemente si se quiere mantener la ciencia mexicana en la vanguardia y acondicionarse para cumplir los requisitos, cada vez más exigentes, de normas internacionales. Esto es especialmente crítico para que los grupos de tecnología para la exploración (módulo 6) pasen de la fase liderazgo de paquetes completos dentro de un instrumento de frontera, a en el futuro liderar el diseño, pruebas y manufactura de un instrumento completo en infraestructura internacional. El fortalecimiento de la infraestructura conlleva vinculación entre centros CONACYT, fomenta la interdisciplinariedad, por ejemplo, aunando electrónica con óptica, y procura derramas tecnológicas. Entre los laboratorios de gran alcance prioritarios para el PILA se reconocen:

- a) Observatorios bi o tri-nacionales: Gran Telescopio Milimétrico (GTM), *High-Altitude Water Cherenkov* (HAWC), Gran Telescopio Canarias (GTC), Telescopio San Pedro Mártir de 6.5m (TSPM6.5), en operación, construcción o diseño.
- b) Observatorios Nacionales: Observatorio Astrofísico Guillermo Haro, en operación desde finales de los años 80, con necesidades de nuevos instrumentos astronómicos de diseño específico, fabricados en los centros.
- c) Laboratorios de instrumentación astronómica, a través de concurso de fondos para iniciar y colaborar con socios nacionales e internacionales en el diseño y construcción de nuevos instrumentos únicos para los observatorios de a) y b) y otros de oportunidad internacional, como WEAVE y WSO.

- d) Laboratorio para el análisis isotópico y de geocronología: instalar equipos de espectrometría de masa (i) con fuente de ionización térmica (TIMS) y (ii) con fuente de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS).
- e) Laboratorio de paleotermometría y paleobarometría de rocas: sustituir el microscopio electrónico de barrido de los setenta por una microsonda de nueva generación.
- f) Laboratorio de pronóstico meteorológico, red mareográfica y de estaciones meteorológicas de superficie: adquirir y operar perfiladores acústicos y ópticos (Sodars y Lidars) de la capa planetaria atmosférica; ampliar la infraestructura de supercómputo dedicada a la modelación numérica del océano y la atmósfera.
- g) Redes sismológicas: actualizar instrumentos e incrementar el número de estaciones, particularmente las de cobertura regional. Esto permitirá un mejor monitoreo de la sismicidad, mejor medición de la aceleración del terreno y mejores estimaciones de riesgo sísmico.
- h) Red geodésica: instalación, operación y mantenimiento de una red de geodésica con equipos de GPS para monitoreo de la deformación
- i) Plataformas de observación oceanográfica: reducir costos de uso de barcos, facilitar el acceso de buques de investigación del gobierno mexicano. Incrementar el número de boyas oceanográficas para un mejor monitoreo de los mares mexicanos.
- j) Laboratorios nacionales y regionales de nanofotónica y metamateriales: adquisición de equipo de nanofabricación y nanocaracterización.
- k) Laboratorio de microscopía: centro en el que confluyeran los usuarios, biólogos, principalmente, con los grupos de desarrollo de nuevas técnicas de microscopía.
- l) Para realizar investigación en ciertos aspectos del procesamiento de materiales es necesario el acceso a fuentes ultraintensas y ultrarrápidas de luz. El desarrollo de este tipo de fuentes constituye en sí un área de investigación básica.
- m) Centros de supercómputo: como el del Puerto Interior del CIMAT en el Estado de Guanajuato, o el CNS del IPICYT, que dan acceso a toda la comunidad académica de los centros y apoyar la creación del Centro Binacional de Supercómputo México-Estados Unidos, que beneficiará a toda la comunidad científica mexicana
- n) Laboratorio Nacional de Investigaciones en Nanociencias y Nanotecnología (*LINAM*)
- o) Centros de almacenamiento de bases de datos nacionales: como el Repositorio Nacional de Imágenes Satelitales proyectado para operar en el PCTY del Estado de Yucatán en colaboración con la Agencia Espacial Mexicana.

7.7.2 Infraestructura de obra civil

En todos los centros se necesita renovación y ampliación de la planta académica para atender a los retos científicos de esta década en materia de naturaleza del Universo. Además de creación de nuevas plazas, los espacios disponibles empiezan a ser insuficientes. Se hace necesario, en consecuencia, plantear un programa estratégico para el crecimiento de infraestructura física que permita la ubicación de nuevos investigadores en espacios apropiados y fomentar la interacción entre los investigadores. De igual forma, el necesario crecimiento de los laboratorios, también fuera de las tradicionales sedes de los centros. También es importante crear unidades foráneas de los

actuales centros de investigación para satisfacer las necesidades de crecimiento regional y en su caso para mejorar los esquemas de monitoreo y adquisición de datos.

7.7.3 Infraestructura computacional específica

El quehacer científico está estrechamente relacionado al acceso a servicios de cómputo que, en proyectos específicos, requiere de grandes prestaciones, bancos y distribuidores de datos, que es ya una necesidad tratada en 7.7.1.

Adicionalmente, hay experimentos con una capacidad de generación de datos que sobrepasa las planeadas en estos centros nacionales. Tal es el caso del GTM y HAWC. Estas infraestructuras observacionales necesitan realizar almacenamiento temporal y definitivo de los datos crudos, procesamiento inmediato, análisis y simulación. Además, ambas se acercan al máximo de operación lo que conlleva al aumento en el volumen de datos adquiridos por almacenar y procesar, sobrepasando las capacidades de cómputo actualmente disponibles. A efecto de optimizar el retorno científico de estas y otras inversiones, resulta imprescindible que se cuente con acceso a los equipos y software apropiados

Se debe contar, además, con los recursos financieros para mejorar significativamente las redes internas de los centros y su conectividad al resto del mundo, además de equipos de cómputo personales actualizados para todo el personal investigador. La conectividad, estable y de alta velocidad, hará posible desarrollar de manera óptima la investigación.

8. Resultados esperados a 3, 7 y 10 años

Debemos consolidar grupos científicos y tecnológicos para aprovechar todo el potencial de la inversión reciente en infraestructura y desarrollar nueva instrumentación para los mismos. Esto requiere planeamiento estratégico de financiación a largo plazo y formación y retención de recursos humanos especializados en las áreas prioritarias.

Los resultados dependerán del nivel de apoyo otorgado y de las políticas de becas, contrataciones, disponibilidad de nuevas plazas y financiamiento para los grandes proyectos y el desarrollo de nueva infraestructura. En los rubros más importantes los resultados observables de manera significativa serán a largo plazo (7 y 10 años).

Se describe a continuación una serie metas e indicadores generales de crecimiento que pueden medir el buen desarrollo de la implementación del PILA. Con frecuencia los indicadores con los que se mide la productividad de las instituciones de investigación se basan en número de doctores contratados para la investigación y desarrollo tecnológico, número de técnicos académicos, pertenencia al SNI, publicaciones arbitradas, citas, autorías y edición de libros, impartición de pláticas magistrales y participación en congresos, obtención de patentes, visitantes recibidos, matrícula de estudiantes de posgrado, cursos impartidos, estudiantes graduados, proyectos vigentes con financiación externa, publicaciones de difusión, pláticas de difusión, participación en programas radiofónicos y medios escritos, atención a ferias de ciencia, etc. De éstos se han entresacado los más relevantes que se han destacado en el documento como “cuello de botella” para un mejor crecimiento. Además, dado que el PILA pretende una mayor interacción entre los centros, se hace hincapié en el reclutamiento de jóvenes valores que arranquen y consoliden líneas estratégicas de investigación y en la interrelación de investigadores entre los centros. Los objetivos son progresivos en el tiempo, pasando por una etapa de implantación, crecimiento y consolidación.

Dada la indefinición sobre la financiación a la que se pueda tener acceso, estas metas ya establecen objetivos de crecimiento sobre el status quo de 7 instituciones que se dedican de forma individual, aunque con notables colaboraciones puntuales, al estudio de la naturaleza del Universo.

A 3 años:

- Crecimiento de la planta académica existente a través de nuevas contrataciones; tanto por vía del programa de Cátedras-CONACYT para jóvenes investigadores, como por vía de la creación y regularización de las plazas académicas institucionales, destinando una fracción importante para un programa permanente de estancias posdoctorales.

Indicador A: número de investigadores incorporados.

Indicador B: número de investigadores incorporados en régimen posdoctoral.

- Informe sobre el estado de las capacidades de investigación de los centros CONACYT que incluya número de investigadores activos, líneas de investigación, infraestructura con la que cuentan, número de alumnos graduados y lugares donde laboran.

Indicador: informe consensuado y validado por los diferentes centros, "auto-actualizable", visible y accesible desde las páginas web del CONACYT y de los diferentes centros participantes del PILA.

- Contar con un programa estratégico enfocado a la realización de eventos, series de conferencias y seminarios conjuntos entre investigadores de los diferentes centros, buscando integrar capacidades complementarias y buscando abordar problemas de interés común.

Indicador: programa consensuado, validado por los grupos de investigación en los diferentes centros, visible y accesible en internet.

- Incremento en el número de publicaciones conjuntas entre investigadores de los diferentes centros, lo que dependerá del apoyo a los proyectos de colaboración y la flexibilidad para la contratación de postdocs.

Indicador: número de publicaciones conjuntas.

- Consolidación de proyectos de instrumentación científica con participación de dos o más centros CONACYT.

Indicador A: número de acuerdos específicos para el diseño, fabricación o pruebas de dispositivos.

Indicador B: número de presentaciones conjuntas en conferencias de instrumentación científica por equipos de diversos centros.

Indicador D: número de reportes técnicos internacionales con participación de más de un centro CONACYT.

- Fortalecimiento de investigación y de las colaboraciones científicas entre investigadores y grupos de investigación en los diferentes centros e investigadores y grupos de investigación del medio académico internacional.

Indicador A: número y duración de estancias realizadas por investigadores internacionales invitados para colaborar con investigadores y grupos de los diferentes centros.

Indicador B: número de publicaciones científicas conjuntas.

- Plan estratégico de fortalecimiento de la infraestructura y principios de inversión en construcción y equipo mayor.

Indicador A: plan estratégico consensuado y validado por los diferentes centros y el CONACYT.

Indicador B: inversión en ampliación, actualización y mejoramiento de instalaciones existentes

Indicador C: inversión en laboratorios y equipo mayor.

- Programas de mejoramiento de los mecanismos de captación y selección de estudiantes a los programas docentes de los centros

Indicador: número de alumnos admitidos a los programas docentes.

- Coordinación e intercambio de material de los talleres para profesores y para jóvenes de los diversos centros CONACYT participantes en el PILA "Naturaleza del Universo"

Indicador: memoria de actividades conjuntas

- Acción conjunta de divulgación sobre la naturaleza del Universo

Indicador A: número de spots y cápsulas de audio y video.

Indicador B: número de artículos y boletines informativos

Indicador C: número de apariciones de investigadores y estudiantes asociados al PILA en medios de comunicación

Indicador D: número de seguidores y actividad en redes sociales

A 7 años:

- Observación de la consolidación y crecimiento de los resultados anteriores.
- Crecimiento sostenido de la planta académica a través de nuevas contrataciones.

Indicador: Número de investigadores incorporados.

- Incremento en el número de publicaciones en revistas de reconocido prestigio.

Indicadores: Número de publicaciones y niveles de calidad de las revistas.

- Incremento en el impacto de las publicaciones -dependerá de la planta de investigadores, de las líneas de investigación, de cada disciplina y de la infraestructura.

Indicadores: Distribución a lo largo de los años del factor de impacto de las publicaciones por disciplina. Distribución a lo largo de los años de los números de citas por disciplina.

- Generación de nuevas líneas de investigación a través de la creación de posiciones académicas con perfiles específicos para su desarrollo, privilegiando la interacción interdisciplinaria entre los diferentes centros.

Indicador: Número de investigadores incorporados con perfil específico en nuevas líneas de investigación.

- Consolidación del programa de visitas académicas de extranjeros -dependerá de las relaciones internacionales de los grupos de investigación, de las líneas de investigación y de la infraestructura.

Indicador: Número de visitantes académicos extranjeros.

- Aumento de eventos académicos especializados, nacionales e internacionales

Indicador: Número de eventos; número de participantes; instituciones de procedencia de los plenaristas; etc.

- Consolidación de la infraestructura existente y en desarrollo en las diferentes sedes de cada uno de los centros.

Indicador A: Metros cuadrados construidos, entregados y en funcionamiento.

Indicador B: Equipo adquirido y en funcionamiento.

- Incremento en el número de laboratorios nacionales, centros de almacenamiento y procesamiento avanzado de datos y laboratorios de 'gran calado'.

Indicador: Cuantificación de la inversión en equipo mayor y número de laboratorios

- Incremento en la matrícula de estudiantes -dependerá del apoyo a nuevas contrataciones, de la implementación del programa de posdoctorantes, de la mejora de la infraestructura y del desarrollo de las líneas de investigación.

Indicador: Matrícula de estudiantes en maestría y doctorado.

- Incremento significativo en la eficiencia terminal.

Indicador: Eficiencia terminal.

- Incremento en el número de alumnos egresados de los programas docentes con membresía en el SNI -dependerá del apoyo a los proyectos de colaboración y a la contratación de postdocs.

Indicador: Egresados con membresía en el SNI, distribuidos por nivel.

A 10 años:

- Observar niveles significativos de consolidación en todos los rubros anteriores con sus correspondientes indicadores.
- Haber observado, a lo largo de diez años, gráficas de crecimiento acelerado en materia de crecimiento de planta académica, productividad científica, colaboraciones conjuntas, incremento de la matrícula de los diferentes posgrados a cargo de los centros, inversión en infraestructura y equipo mayor, así como un incremento significativo en el impacto de la actividad científica y su reconocimiento en el medio científico internacional.
- Contar con un equipo científico en los centros CONACYT capaz de encabezar el diseño, fabricación, pruebas y explotación científica de un instrumento científico de envergadura.
- Mayor visibilidad en los medios de comunicación y establecimiento de un sólido programa intercentro de divulgación científica sobre la naturaleza del Universo, con incidencia en programas de la SEP.

9. Identificación de grupos de trabajo en los Centros

9.1 El Universo que nos rodea

- 1) Cosmología: energía oscura, materia oscura, propiedades (y parámetros) globales del Universo, estructura a gran escala – Aretxaga, Hughes, López-Cruz, Montaña, Elena Terlevich, Roberto Terlevich (todos INAOE)
- 2) Formación y evolución de galaxias: hoyos negros, AGNs, brotes de formación estelar, cúmulos estelares, dinámica – Aretxaga, Carramiñana, Carrasco, Chavushyan, Guichard, Hughes, León-Tavares, Longinotti, López-Cruz, Luna, Mayya, Montaña, Mújica, Puerari, Recillas, Rodríguez, Rosa-González, Rosales, Silich, Tenorio-Tagle, Terlevich E., Terlevich R., Valdés, Vega (todos INAOE)
- 3) Medios difusos calientes y fríos, circunestelares, galácticos e intergalácticos – Corona, Gómez, Longinotti, Luna, Rodríguez M., Rosales, Silich, Tenorio-Tagle, Terlevich E., Terlevich R., Vega, Wall (todos INAOE)
- 4) Formación y evolución estelar: atmósferas estelares, etapas tempranas, astero-sismología*, objetos compactos -- Bertone, Carramiñana, Carrasco L., Chávez, del Burgo, Gómez, Mendoza, Porras, Rodríguez L. (todos INAOE)
- 5) Formación y evolución planetaria: discos, exoplanetas*, habitabilidad* -- Bertone, Chávez, del Burgo, Vega (todos INAOE)
- 6) Astropartículas y relación con leyes fundamentales de la Física* -- Carramiñana, Longinotti, Torres (todos INAOE)

9.2 Ciencias de la Tierra

- 1) Exploración sísmica y análisis de cuencas: Arturo Martín, Mario González, Antonio González, Francisco Suárez, Juan Contreras (todos CICESE)
- 2) Geoquímica, petrología y geocronología, vulcanología y paleomagnetismo: Arturo Martín, Bodo Weber, Margarita López, Luis Delgado, Edgardo Cañón (todos CICESE).
- 3) Micro-paleontología y palinología: Javier Helenes (CICESE)
- 4) Geohidrología: Thomas G. Kretzschmar, Rogelio Vázquez (todos CICESE)
- 5) Exploración con métodos geofísicos: Enrique Gómez, Francisco Esparza, Carlos Flores, José M. Romo, Marco Antonio Pérez, Juan García, Juan M. Espinoza, Rogelio Vázquez, Luis Gallardo (todos CICESE).
- 6) Inversión y modelado numérico de datos geofísicos: Luis A. Gallardo, Francisco Esparza, Juan García, Enrique Gómez, Marco Pérez (todos CICESE)

- 7) Simulación de ondas y flujos: Pratap Sahay, Jonas De Basabe, Juan Madrid (todos CICESE)
- 8) Neotectónica y geodesia, percepción remota y sistemas de información geográfica: John Fletcher, Olga Sarychikhina, Francisco Suárez, Juan M. Espinoza, Javier González, Alejandro Hinojosa (todos CICESE)
- 9) Redes sísmicas: Víctor Wong; Luis Munguía; Luis Mendoza; Antonio Vidal; Raúl Castro (todos CICESE)
- 10) Estudios de fuente, efectos de sitio y atenuación sísmica: Raúl Castro; Luis Munguía; José Acosta; Antonio Vidal (todos CICESE)
- 11) Peligro sísmico, deformación y sismicidad inducida: Alejandro Nava; Ewa Glowacka; Luis Munguía; Luis Mendoza; Alfonso Reyes (todos CICESE)
- 12) Riesgo geológico: Luis Delgado, Francisco Suárez, Olga Sarychikhina, Marco Antonio Pérez (todos CICESE)
- 13) Sismotectónica: Luis Munguía; José Acosta; Antonio Vidal; José Fréz; Francisco Suárez, Raúl Castro (todos CICESE), Roberto Ortega (Unidad La Paz CICESE)
- 14) Cambio climático global e impacto regional: Tereza Cavazos, Edgar Pavía, Federico Graef, Francisco Ocampo, Cuauhtémoc Turrent (todos CICESE)
- 15) Circulación en el Golfo de California: Guido Marinone, Manuel López Mariscal, Armando Trasviña, Emilio Beier (todos CICESE)
- 16) Dinámica de fluidos geofísicos: Luis Zavala Sansón, José Luis Ochoa de la Torre, Oscar Velasco, Julio Sheinbaum (todos CICESE)
- 17) Oceanografía costera: Luis Gustavo Alvarez, Isabel Ramírez (todos CICESE)
- 18) Oceanografía y circulación del Golfo de México y Mar Caribe: Julio Candela, Julio Sheinbaum, José Luis Ochoa, Manuel López, Paula Pérez Brunius, Enric Pallas, Joao Azevedo (todos CICESE)
- 19) Oceanografía y circulación del Pacífico mexicano: Alejandro Parés, José Gómez, Emilio Beier, Armando Trasviña, Guido Marinone, Joao Azevedo (todos CICESE)
- 20) Oleaje e interacción océano- atmósfera: Francisco Ocampo, Pedro Osuna (todos CICESE)
- 21) Nivel del mar y tsunamis: Modesto Ortiz (CICESE)
- 22) Energía oceánica renovable: Vanesa Magar, Markus Gross, Francisco Ocampo, Cuauhtémoc Turrent (todos CICESE)
- 23) Cambio climático global e impacto regional: Tereza Cavazos, Cuauhtémoc Turrent, Edgar Pavía (todos CICESE)
- 24) Modelación numérica del océano y la atmósfera: Markus Gross, Alejandro Parés, Julio Sheinbaum, Francisco Ocampo, Vanesa Magar, Guido Marinone, Joao Azevedo (todos CICESE)
- 25) Dinámica de lagunas costeras: José Gómez, Isabel Ramirez (todos CICESE)
- 26) Química del océano: Saúl Álvarez Borrego, Juan Carlos Herguera García, Sharon Herzka Llona, Gilberto Gaxiola Castro, Rubén Lara Lara (todos CICESE)
- 27) Oceanografía dinámica observacional: Julio Sheinbaum, Julio Candela, Enric Pallas, Paula Pérez, José Luis Ochoa, Armando Trasviña, Emilio Beier, José Gómez, Manuel López (todos CICESE)
- 28) Meteorología y climatología regional y de gran escala: Tereza Cavazos, Edgar Pavía, Federico Graef, Julio Sheinbaum, Markus Gross, Vanesa Magar, Luis Farfán, Luis Brito,, Sergio Reyes, Cuauhtémoc Turrent (todos CICESE)
- 29) Ciclones tropicales: Luis Farfán, Tereza Cavazos (todos CICESE)
- 30) Variabilidad climática: Tereza Cavazos, Edgar Pavía, Federico Graef, Julio Sheinbaum, Luis Brito, Cuauhtémoc Turrent (todos CICESE)
- 31) Meteorología operacional: Luis Farfán, Markus Gross, Cuauhtémoc Turrent (todos CICESE)

9.3 Interacción luz-materia

- 1) Biofotónica y microscopía óptica: Noé Alcalá Ochoa (CIO), Josué Álvarez Borrego (CICESE), Alejandro Cornejo Rodríguez (INAOE), Ramón Carriles Jaimes (CIO), Sabino Chávez Cerda (INAOE), Jorge Mauricio Flores Moreno (CIO), Claudio Frausto Reyes (CIO), Fermín Salomón Granados Agustín (INAOE), María del Socorro Hernández Montes (CIO), Tzarara López Luke (CIO), Rosario Porras Aguilar (INAOE), Eugenio Rafael Méndez Méndez (CICESE), Fernando Mendoza Santoyo (CIO), Kevin Arthur O'Donnell (CICESE), Julio César Ramírez San Juan (INAOE), Rubén Ramos García (INAOE), Gabriel Ramos Ortiz (CIO), Raúl Rangel Rojo (CICESE), Israel Rocha Mendoza (CICESE), Ulises Ruíz Corona (INAOE), Víctor Ruiz Cortes (CICESE), Eduardo Tepichín Rodríguez (INAOE), Carlos Gerardo Treviño Palacios (INAOE), Gonzalo Urcid Serrano (INAOE).
- 2) Esparcimiento y óptica estadística: Bernardino Barrientos García (CIO), Moisés Cywiak Garbarcewicz (CIO), Héctor Manuel Escamilla Taylor (CICESE), Rafael Espinosa Luna (CIO), Gabriel Martínez Niconoff (INAOE), Eugenio Rafael Méndez Méndez (CICESE), Serguei Miridonov (CICESE), Javier Muñoz López (INAOE), Alma Georgina Navarrete Alcalá (CICESE), Pedro Negrete Regagnon (CICESE), Kevin Arthur O'Donnell (CICESE), Víctor Ruiz Cortes (CICESE), Mikhail Shlyagin (CICESE), Elena Tchaikina Kolesnikova (CICESE).
- 3) Láseres y fuentes novedosas de luz: Vicente Aboites Manrique (CIO), Yury Barmenkov (CIO), Santiago Camacho López (CICESE), Roger Sean Cudney Bueno (CICESE), Manuel Durán Sánchez (INAOE), Karina Garay Palmett (CICESE), Alfonso García Weidner (CICESE), Baldemar Ibarra Escamilla (INAOE), Alexander Kiriyarov (CIO), Evgeny Kuzin (INAOE), Ma Alejandrina Martínez Gamez (CIO), Alejandro Martínez Rios (CIO), Efraín Mejía Beltrán (CIO), Uladzimir Minkovich (CIO), David Monzón Hernández (CIO), Kevin Arthur O'Donnell (CICESE), Alexander Pisarchik (CIO), Jean Michel Pottiez Olivier (CIO), Ponciano Rodríguez Montero (INAOE), Raúl Rangel Rojo (CICESE), Mikhail Shlyagin (CICESE), Elena Tchaikina Kolesnikova (CICESE), Ismael Torres Gómez (CIO), Carlos Gerardo Treviño Palacios (INAOE), Gloria Veronica Vázquez García (CIO).
- 4) Materiales y metamateriales ópticos: Norberto Arzate Plata (CIO), J Oracio Cuahutémoc Barbosa García (CIO), Santiago Camacho López (CICESE), Ismael Cosme Bolaños (INAOE), Elder de la Rosa Cruz (CIO), Hagge Desirena Enríquez (CIO), Luis Armando Diaz Torres (CIO), Alfonso García Weidner (CICESE), Anatoly Khomenko (CICESE), José Luis Maldonado Rivera (CIO), Heriberto Márquez Becerra (CICESE), Bernardo Mendoza Santoyo (CIO), Marco Antonio Meneses Nava (CIO), Serguei Miridonov (CICESE), Arturo Olivares Pérez (INAOE), Juan Luis Pichardo Molina (CIO), David Salazar Miranda (CICESE), Mikhail Shlyagin (CICESE), Diana Tentori Santacruz (CICESE), Raúl Alfonso Velázquez Nava (CIO).
- 5) Óptica cuántica: Roger Sean Cudney Bueno (CICESE), Karina Garay Palmett (CICESE), Héctor Manuel Moya Cessa (INAOE), Kevin Arthur O'Donnell (CICESE), Blas Manuel Rodríguez Lara (INAOE), José Javier Sánchez Mondragón (INAOE), Francisco Soto Equibar (INAOE), Serguei Stepanov (CICESE).
- 6) Óptica no lineal y procesamiento óptico de materiales: Víctor Manuel Arrizón Peña (INAOE), Santiago Camacho López (CICESE), Ramón Carriles Jaimes (CIO), Enrique Castro Camus (CIO), Sabino Chávez Cerda (INAOE), Roger Sean Cudney Bueno (CICESE), Karina Garay Palmett (CICESE), Marcelo David Iturbe Castillo (INAOE), Baldemar Ibarra Escamilla (INAOE), Anatoly Khomenko (CICESE), Nikolai Korneev Zabello (INAOE), Svetlana Mansurova (INAOE), Gabriel Ramos Ortiz (CIO), Raúl Rangel Rojo (CICESE), Israel Rocha Mendoza (CICESE), Julián David Sánchez de la Llave (INAOE), Alexander Shcherbakov (INAOE), Mikhail Shlyagin (CICESE), Serguei Stepanov (CICESE).
- 7) Plasmónica y nanofotónica: Víctor Manuel Coello Cárdenas (CICESE), Rodolfo Cortés Martínez (CICESE), Elder de la Rosa Cruz (CIO), Hagge Desirena Enríquez (CIO), Luis Armando Diaz Torres (CIO), Anatoly Khomenko (CICESE), Tzarara López Luke (CIO), Donato Luna Moreno (CIO), Heriberto Márquez Becerra (CICESE), Gabriel Martínez Niconoff (INAOE), Eugenio Rafael Méndez Méndez (CICESE), Bernardo Mendoza Santoyo

(CIO), Pedro Negrete Regagnon (CICESE), Juan Luis Pichardo Molina (CIO), Raúl Rangel Rojo (CICESE), Víctor Ruiz Cortes (CICESE), David Salazar Miranda (CICESE), Francisco Villa Villa (CIO).

9.4 Propiedades físico químicas de la materia

- 1) Estudio de las propiedades magnéticas de sistemas nanométricos: Armando Encinas (IPICYT), Francisco Espinosa Magaña (CIMAV), Luis Edmundo Fuentes Cobas (CIMAV), Florentino López Urías (IPICYT), José Andrés Matutes Aquino (CIMAV), José Luis Morán López (IPICYT), Sión Federico Olive Méndez (CIMAV), José Luis Rodríguez López (IPICYT), José Luis Sánchez Llamazares (IPICYT).
- 2) Métodos de física matemática aplicados a sistemas biológicos: Haret C. Rosu Barbus (IPICYT)
- 3) Propiedades electrónicas de materiales orgánicos: Román López Sandoval (IPICYT)
- 4) Estudio de materiales semiconductores nanoestructurados: Luis Edmundo Fuentes Cobas (CIMAV), José Luis Morán López (IPICYT), Vicente Rodríguez González (IPICYT)
- 5) Estudio de las propiedades magnéticas de nuevos materiales: Horacio Flores Zúñiga (IPICYT), Luis Edmundo Fuentes Cobas (CIMAV), José Andrés Matutes Aquino (CIMAV), José Luis Morán López (IPICYT), David Ríos Jara (IPICYT), José Luis Sánchez Llamazares (IPICYT),

9.4 El lenguaje del Universo

(Se enlistan solamente los responsables de los grupos)

- 1) Álgebra: José Antonio de la Peña (CIMAT)
- 2) Procesamiento de imágenes y señales: Mariano Rivera Meraz (CIMAT)
- 3) Ciencias de la Computación: Salvador Botello Rionda (CIMAT)
- 4) Algoritmos Evolutivos: Arturo Hernández (CIMAT)
- 5) Ingeniería de Software: Cuauhtémoc Lemus (CIMAT)
- 6) Probabilidad, Procesos Estocásticos y Análisis Topológico de Datos: Víctor Pérez Abreu Carrión (CIMAT)
- 7) Estadística y vinculación: Graciela González Farias (CIMAT), María Antonieta Zuloaga (CIMAT)
- 8) Análisis matemático: Berta Gamboa de Buen (CIMAT)
- 9) Geometría: Jimmy Petean Humen (CIMAT), Adolfo Sánchez Valenzuela (CIMAT)

Otros investigadores en el grupo de 3 de Ciencias de la Computación: Jesús A González (INAOE), Ariel Carrasco (INAOE), Francisco Martínez-Trinidad (INAOE), Eduardo Morales (INAOE).

9.6 Tecnologías para la exploración del Universo

- 1) Instrumentación astronómica: Diana Lucero Alba (CIDESI), José Luis Avilés Urbiola (INAOE), Vicente Bringas (CIDESI), Esperanza Carrasco Licea (INAOE), Edgar Castillo Domínguez (INAOE), Alejandro Cornejo (INAOE), Daniel Ferrusca Rodríguez (INAOE), Fermín Granados Agustín (INAOE), Celso Gutiérrez Martínez (INAOE), Javier de la

Hidalga (INAOE), Andrei Kosarev (INAOE), Mario Moreno (INAOE), Gonzalo Páez Padilla (CIO), Elizabeth Percino Zacarias (INAOE), Marija Strojnik Pogacar (CIO), Alfonso Torres (INAOE), Carlos Treviño (INAOE), Miguel Velázquez de la Rosa (INAOE).

- 2) Instrumentación en microscopía óptica, óptica biomédica y biofotónica: Félix Aguilar Valdez (INAOE), José Javier Báez Rojas (INAOE), Luis Raúl Berriel Valdós (INAOE), Ramón Carriles Jaimes (CIO), Alejandro Cornejo Rodríguez (INAOE), Jorge Castro Ramos (INAOE), Víctor Manuel Coello Cárdenas (CICESE-MTY), Rodolfo Cortés Martínez (CICESE-MTY), David Michael Gale (INAOE), Fermín Granados Agustín (INAOE), Alberto Jaramillo Núñez (INAOE), Juan Luis Pichardo Molina (CIO), Raúl Rangel Rojo (CICESE), Francisco Renero Carrillo (INAOE), Israel Rocha Mendoza (CICESE), Víctor Ruiz Cortés (CICESE)
- 3) Implementación y desarrollo de fuentes láseres: Yuri Barmenkov (CIO), Santiago Camacho López (CIO), Roger Cudney Bueno (CIO), Alexander Kir'yanov (CIO), Alejandro Martínez (CIO), Efraín Mejía (CIO), Olivier Pottiez (CIO), Raúl Rangel Rojo (CICESE), Diana Tentori Santacruz (CICESE), Mikhail Shlyagin (CICESE), Ismael Torres (CIO).

10. Identificación de Socios Estratégicos

Las instituciones declaradas a continuación son socios estratégicos ya establecidos a través de sólidas relaciones de colaboración, con proyectos concretos. No se declaran instituciones con las que se podría colaborar a futuro, dejando esta iniciativa a los propios investigadores y a los proyectos que se puedan impulsar en el futuro.

Sociedad Americana de Matemáticas (American Mathematical Society), EEUU:
<http://www.ams.org/home/page> (módulo 5)

Arizona State University, EEUU: School of Earth and Space Exploration, sese.asu.edu/astrophysics (módulo 1/6)

Banff International Research Station, Canadá, <http://www.birs.ca/> (modulo 5)

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México: Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, www.fcm.buap.mx, Instituto de Física <http://www.ifuap.buap.mx/> (módulo 1/3)

California Institute of Technology, EEUU: <http://www.gps.caltech.edu/> (módulo 2)

Cardiff University, Gran Bretaña: School of Physics and Astronomy, www.astro.cardiff.ac.uk (módulo 1/6)

Centre National de la Recherche Scientifique, Francia: <http://www.cnrs.fr/>

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV), México: Departamento de Física, www.fis.cinvestav.mx (módulo 1/4), Departamento de Física Aplicada <http://www.cinvestav.mx/Departamentos/FisicaAplicada%28UnidadMerida%29.aspx> (módulo 4), Departamento de Matemáticas, <http://www.math.cinvestav.mx/> (módulo 5); Campus Querétaro, www.qro.cinvestav.mx (modulo 6); Campus Mérida, <http://www.mda.cinvestav.mx/> (módulo 5/6), LANGEBIO <http://www.langebio.cinvestav.mx/> (módulo 5)

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), México:
<http://www.cenapred.unam.mx/es/> (módulo 2)

Colorado State University, EEUU: Department of Physics, www.physics.colostate.edu (módulo 1)

Comisión Federal de Electricidad (CFE), México: <http://www.cfe.gob.mx/paginas/home.aspx> (módulo 2)

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), México: <http://www.conagua.gob.mx/> (módulo 2)

FRACTAL S.A., España, www.fractal-es.com (módulo 6)

George Mason University, EEUU: School of Physics, Astronomy and Computational Sciences, spacs.gmu.edu (módulo 1)

Georgia Institute of Technology, EEUU: Center for Relativistic Astrophysics, www.cra.gatech.edu (módulo 1)

Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, EEUU, www.cfa.harvard.edu (modulo 1/6)

Imperial College of Science, Technology and Medicine, Reino Unido, Department of Physics <https://www.imperial.ac.uk/natural-sciences/departments/physics/> (módulo 3)

Institut d'optique, Paris, Francia <http://www.institutoptique.fr/> (módulo 3)

Institut Fresnel, Francia, <http://www.fresnel.fr/spip/> (módulo 3)

Institute for Mathematics and its Applications, EEUU, <http://www.ima.umn.edu/> (modulo 5)

Institute of Photonic Science, EEUU, www.cfo.edu (módulo 6)

Instituto de Astrofísica de Canarias, España, www.iac.es (módulo 1/6)

Instituto de Astrofísica de Andalucía, España, www.iaa.es (módulo 1/6)

Instituto de Ciencias Fotónicas, España, <http://www.icfo.eu/> (módulo 3)

Instituto de Óptica, España <http://www.io.csic.es/> (módulo 3)

Instituto Politécnico Nacional, México: Centro de Investigación en Computación, www.cic.ipn.mx (módulo 1); Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas www.upiita.ipn.mx (módulo 1)

Los Alamos National Laboratory, EEUU, www.lanl.gov (módulo 1)

Michigan State University, EEUU: Department of Physics and Astronomy, www.pa.msu.edu (módulo 1)

Michigan Technological University, EEUU: Department of Physics, www.mtu.edu/physics (módulo 1)

NASA/Goddard Space Flight Center, EEUU: <http://www.nasa.gov/centers/goddard/home/index.html> (módulo 1)

National Radio Astronomical Observatory, EEUU, www.nrao.edu (módulo 1)

Ohio State University at Lima, EEUU: Department of Physics and Astronomy,
lima.osu.edu/academics/physics (módulo 1)

Pacific Institute for the Mathematical Sciences, Canadá: <https://www.pims.math.ca/> (modulo 5)

Pennsylvania State University, EEUU: Eberly College of Science, www.phys.psu.edu (módulo 1)

Petroleos Mexicanos (PEMEX), México: <http://www.pemex.com/Paginas/default.aspx> (módulo 2)

Protección Civil, México: <http://www.proteccioncivil.gob.mx/> (módulo 2)

San Diego State University, EEUU: <http://sci.sdsu.edu/geology/> (módulo 2)

Secretaría de Energía (SENER), México: <http://www.energia.gob.mx/> (módulo 2)

Secretaría de Gobernación (SEGOB), México: www.gobernacion.gob.mx (módulo 2)

Servicio Sismológico Nacional, México: <http://www.ssn.unam.mx/> (módulo 2)

Stanford University, EEUU: Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology,
kipac.stanford.edu/kipac (modulo 1)

Universidad Autónoma de Baja California, México <http://fciencias.ens.uabc.mx/> (módulo 3)

Universidad Autónoma de Chiapas, México, www.unach.mx (módulo 1)

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México, www.uaeh.edu.mx (módulo 1)

Universidad Autónoma de Madrid, España: Departamento de Física Teórica, www.ft.uam.es
(módulo 1)

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, México
<http://www.fcfm.uanl.mx/> (módulo 5)

Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Matemáticas de la UAM-Iztapalapa,
<http://mat.izt.uam.mx/mat/> (módulo 5)

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México: Instituto de Física, <http://www.ifisica.uaslp.mx/>
(módulo 4)

Universidad Autónoma de Yucatán, México: Facultad de Matemáticas
<http://www.matematicas.uady.mx/> (módulo 5)

Universidad Autónoma de Zacatecas, México: Unidad Académica de Matemáticas
<http://matematicas.reduaz.mx/web/> (módulo 5)

Universidad de Chile: Departamento de Física <http://www.dfi.uchile.cl/> (módulo 4)

Universidad Complutense de Madrid, España: Departamento de Astronomía y Ciencias de la
Atmósfera, www.ucm.es/info/Astrof/departamento.html (módulo 1/6)

Universidad de Guadalajara, México: Instituto de Astronomía y Meteorología, www.iam.udg.mx
(módulo 1)

Universidad de Guanajuato, México: Departamento de Física <http://www.dfisica.ugto.mx/> (módulo 3), Departamento de Matemáticas <http://www.demat.ugto.mx/> (módulo 5)

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México, www.umich.mx (módulo 4)

Universidad Nacional Autónoma de México: Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico <http://www.ccadet.unam.mx/> (módulo 3/4); Centro de Ciencias Matemáticas, Morelia, <http://www.matmor.unam.mx/> (módulo 5); Centro de Investigación en Materiales, <http://www.iim.unam.mx/> (módulo 4); Centro de Nanociencias y Nanotecnología, <http://www.cnyn.unam.mx/> (módulo 3/4/6); Centro de Radioastronomía y Astrofísica, www.crya.unam.mx (módulo 1), Departamento de Matemáticas de la Facultad de Ciencias, <http://www.fciencias.unam.mx/nosotros/organizacion/7> (módulo 5); Instituto de Astronomía, www.astrocu.unam.mx/IA/index.php (módulo 1); Instituto de Biotecnología, <http://www.ibt.unam.mx/> (módulo 3); Instituto de Ciencias Nucleares, www.nucleares.unam.mx/icn2 (módulo 1/3); Instituto de Geología, <http://www.geologia.unam.mx/igl/> (módulo 2), Instituto de Geofísica, www.geofisica.unam.mx (módulo 1/2); Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y Sistemas, <http://www.iimas.unam.mx/> (módulo 5); Instituto de Física www.fisica.unam.mx (módulo 1/3/4); Instituto de Matemáticas, <http://www.matem.unam.mx/> (módulo 5); Laboratorio Nacional de Microscopía Avanzada, www.lnma.unam.mx/ (módulo 6).

Universidad Politécnica de Pachuca, México, www.upp.edu.mx/front (módulo 1)

Universidad Politécnica Madrid, España, www.upm.es (módulo 6)

Universidad de Valladolid, España: Departamento de Física Teórica, Atómica y Óptica <http://www.ftao.uva.es/> (módulo 4)

Universidad Veracruzana, México: Centro de Investigaciones en Micro y Nanotecnología <https://www.uv.mx/veracruz/microna/> (módulo 6)

Universität de Kassel, Alemania, <http://www.uni-kassel.de/uni/> (módulo 4)

Universitat Politècnica de Catalunya, España: CINME <http://www.cimne.com/> (módulo 5)

Université de Technologie de Troyes, Francia, <http://www.utt.fr/fr/index.html> (módulo 3)

Université de Strasbourg, Francia, <http://www.unistra.fr/index.php?id=accueil> (módulo 4)

University of Alabama, EEUU: Department of Physics and Astronomy, physics.ua.edu (módulo 1)

University of Arizona, EEUU: Department of Astronomy, www.as.arizona.edu (módulo 1), Department of Physics, <http://w3.physics.arizona.edu/> (módulo 3), Department of Mathematics <http://math.arizona.edu/> (módulo 5)

University of California, Irvine, EEUU: Department of Physics and Astronomy, www.physics.uci.edu (módulo 1), Beckman Institute, <http://www.bli.uci.edu/> (módulo 6)

University of California, San Diego, EEUU: Scripps <https://scripps.ucsd.edu/undergrad/earth-sciences-bs> (módulo 2)

University of California, Santa Cruz, EEUU: Santa Cruz Institute for Particle Physics, scipp.ucsc.edu (módulo 1)

University of Florida, EEUU: Department of Astronomy, www.astro.ufl.edu (módulo 1).

University of Maryland, EEUU: Department of Physics, umdphysics.umd.edu (módulo 1)

University of Massachusetts, Amherst, EEUU: Department of Astronomy, www.astro.umass.edu (módulo 1/6).

University of New Hampshire, EEUU: Department of Physics, www.physics.unh.edu (módulo 1)

University of New Mexico, EEUU: Department of Physics and Astronomy, physics.unm.edu (módulo 1)

University of Oxford, Gran Bretaña: Department of Physics,
<http://www2.physics.ox.ac.uk/research/astrophysics> (módulo 1/6)

University of Rochester, EEUU: Department of Physics and Astronomy, www.pas.rochester.edu (modulo 1/3)

University of Texas, Dallas, EEUU: Department of Mathematics, www.utdallas.edu/math (módulo 5)

University of Utah, EEUU: Department of Physics and Astronomy, www.physics.utah.edu (módulo 1)

University of Wisconsin-Madison, EEUU: www.physics.wisc.edu (módulo 1)

11. Posibles interacciones con otros PILAs

(Algunas de las interacciones declaradas son indirectas, declaradas como i)

Se vislumbran interacciones con todos los PILAs formados hasta 2015 en las áreas sustantivas de investigación, y de hecho ya existen vínculos y acciones de colaboración en algunos temas de interés común. Además se vislumbra un rico intercambio de experiencias y competencias en materia de comunicación pública de la ciencia.

a) Sustentabilidad y cambio climático. Este PILA tiene un cruce importante con el módulo de Ciencias de la Tierra, por tratarse de lleno del impacto humano sobre fenómenos climáticos regidos por las múltiples interacciones entre mar, tierra y atmósfera y viceversa. Además se podrá contemplar modelado matemático del impacto de cambio climático y gestión oportuna de los recursos. Por temas: Los océanos y su aprovechamiento (*i*, módulo 2); Prevención de riesgos naturales (módulos 2,5); Establecimiento de líneas base de ecosistemas desde enfoques macroecológicos (*i*, módulo 2); Emisión de gases invernadero (*i*, módulos 2,5), Conservación de recursos hídricos (*i*, módulos 2,5); Impacto del cambio climático en procesos sociales, económicos y ambientales (*i*, módulo 5); Apropriación social del conocimiento (todos los módulos).

b) Innovación tecnológica y manufactura avanzada. Este PILA tiene interacción y potencial de colaboración con todos los módulos del PILA Naturaleza del Universo. Se hace hincapié que el módulo Tecnologías para la exploración del Universo es de hecho manufactura avanzada de instrumentación científica, prototipos únicos, inexistentes en el mercado, que ejercen de tirón sobre el mundo de la tecnología del país. En particular destacamos los temas: Desarrollo de Materiales Avanzados (módulos 3,4); Desarrollo de Nanomateriales y Nanotecnología (módulos 3,4); Manufactura de Alta Tecnología (módulos 1,6).

c) Sector energético. Desde el punto de vista de que las fuentes de energía mayoritariamente utilizadas en la actualidad son de origen natural existen grandes vínculos y afinidades entre las

líneas de investigación de ambos PILAs. Temas de potencial colaboración e impacto son: Desarrollo y aprovechamiento de energías renovables (*i*, módulo 3); Valoración del potencial de producción de energías alternativas (*i*, módulo 2,5); Hidrocarburos (módulo 2); Energía geotérmica y mareas (módulo 2); Energía fotovoltaica (módulos 3,6).

d) Alimentación. Ya que en el PILA Naturaleza del Universo se estudian nuevos materiales y técnicas de criogenia, además de técnicas de análisis de datos, existen temas de cruce entre estos dos PILAs. Por ejemplo, se encuentra potencial colaboración e impacto en: Tecnología Integral (*i*, módulo 4,6); Formas productivas campesinas (*i*, módulo 2)

e) Administración y Política Pública. Hay una infinidad de problemas surgidos de las ciencias sociales que encuentran modelación, simulación y predicción dentro de la matemática y cuyas soluciones retornan a ese entorno social del que han surgido. Es de esta forma que la colaboración de los matemáticos y de los científicos de la computación con científicos de las disciplinas sociales encuentra un cauce muy fructífero con un impacto que potencialmente influye de manera directa o indirecta en cuestiones de política pública. Temas de incidencia son: Crecimiento económico (módulo 5); Seguridad alimentaria (módulo 5). Combate y prevención de la pobreza (*i*, módulo 2); Sociedad Digital (módulo 5); Administración integral del medioambiente (módulos 2, 5).

f) Salud, diabetes y obesidad. Puesto que el PILA requiere desarrollar tecnologías para mejorar la calidad de vida y tratamiento de la diabetes, existen numerosos cauces de colaboración e interacción con los equipos de Tecnologías para la exploración del Universo. Además, en el rubro de medicina preventiva y atención de la salud hay importantes cruces con otros módulos (*i*, módulos 1,3,6).

g) Tecnologías de la Información y Comunicación. Existe una gran incidencia del módulo 5 de El lenguaje del Universo sobre este PILA. En particular hay investigaciones conjuntas en los temas de Análisis de la información de fuentes heterogéneas; Grandes bases de datos; y Política pública de acceso abierto a la información (todos los módulos).

12. Directorio de contactos por Institución (participantes en el PILA)

El siguiente es un directorio de investigadores de las 7 instituciones identificadas como mayores contribuyentes al PILA, que están trabajando en los temas declarados de interés para el avance del conocimiento en La Naturaleza del Universo. No es una lista exclusiva de investigadores de los centros CONACYT que trabajan en el tema Se ofrece como una guía del directorio potencial de participantes. Los mismos no han sido contactados para comunicarles su inclusión en este documento.

CICESE

Módulo 2:

Álvarez, Luis Gustavo, CICESE, Dep. Oceanografía Física, módulo 2: lalvarez@cicese.mx

Álvarez Borrego, Saúl, CICESE, Dep. Ecología marina, módulo 2: alvarezb@cicese.mx

Azevedo, Joao, CICESE, Dep. Oceanografía Física, módulo 2: jazevedo@cicese.mx

Beier, Emilio, CICESE Unidad La Paz módulo 2: ebeier@cicese.mx

Esparza, Francisco, CICESE, Dep. Geofísica Aplicada, módulo 2: fesparz@cicese.mx

Espinoza, Juan M., CICESE, Dep. Geofísica Aplicada, módulo 2: jespinos@cicese.mx

Farfán, Luis, CICESE, Unidad La Paz, módulo 2: farfan@cicese.mx

Fletcher, John, CICESE, Dep. Geología, módulo 2: jfletche@cicese.mx

Flores, Carlos, CICESE, Dep. Geofísica Aplicada, módulo 2: cflores@cicese.mx
Fréz, José, CICESE, Dep. Simología, módulo 2: jofrez@cicese.mx
Gallardo, Luis A., CICESE, Dep. Geofísica Aplicada, módulo 2: lgallard@cicese.mx
García, Juan, CICESE, Dep. Geofísica Aplicada, módulo 2: jgarcia@cicese.mx
Gaxiola Castro, Gilberto, Dep. Oceanografía Biológica, módulo 2: ggaxiola@cicese.mx
Glowacka, Ewa, CICESE, Dep. Simología, módulo 2: glowacka@cicese.mx
Gómez, Enrique, CICESE, Dep. Geofísica Aplicada, módulo 2: egomez@cicese.mx
Gómez, José, CICESE, Dep. Oceanografía Física, módulo 2: jgomez@cicese.mx
González, Antonio, CICESE, Dep. Geología, módulo 2: mindundi@cicese.mx
González, Javier, CICESE, Dep. Simología, módulo 2: Javier@cicese.mx
González, Mario, CICESE, Dep. Geofísica Aplicada, módulo 2: mgonzale@cicese.mx
Graef, Federico, CICESE, Dep. Oceanografía Física, módulo 2: fgraef@cicese.mx
Gross, Markus, CICESE, Dep. Oceanografía Física, módulo 2: mgross@cicese.mx
Helenes, Javier, CICESE, Dep. Geología, módulo 2: jhelenes@cicese.mx
Herguera García, Juan Carlos, CICESE, Dep. Ecología marina, módulo 2: herguera@cicese.mx
Herzka Llona, Sharon, CICESE, Dep. Oceanografía biológica, módulo 2: sherzka@cicese.mx
Hinojosa, Alejandro, CICESE, Dep. Geología, módulo 2: alhinc@cicese.mx
Kretzschma, Thomas G., CICESE, Dep. Geología, módulo 2: tkretzsc@cicese.mx
Lara Lara, Rubén, CICESE, Dep. Oceanografía Biológica, módulo 2: rlara@cicese.mx
López Mariscal, Manuel, CICESE, Dep. Oceanografía Física, módulo 2: malope@cicese.mx
López, Margarita, CICESE, Dep. Geología, módulo 2: marlope@cicese.mx
Madrid, Juan, CICESE, Dep. Simología, módulo 2: juaneu@cicese.mx
Magar, Vanesa, CICESE, Dep. Oceanografía Física, módulo 2: vmagar@cicese.mx
Marinone, Guido, CICESE, Dep. Oceanografía Física, módulo 2: marinone@cicese.mx
Martín, Arturo, CICESE, Dep. Geología, módulo 2: amartin@cicese.mx
Mendoza, Luis, CICESE, Dep. Simología, módulo 2: lmendoza@cicese.mx
Munguía, Luis, CICESE, Dep. Simología, módulo 2: lmunguia@cicese.mx
Nava, Alejandro, CICESE, Dep. Simología, módulo 2: fnava@cicese.mx
Ochoa de la Torre, José Luis, CICESE, Dep. Oceanografía Física, módulo 2: jochoa@cicese.mx
Ortega, Roberto, CICESE Unidad La Paz, módulo 2: ortega@cicese.mx
Ortiz, Modesto, CICESE, Dep. Oceanografía Física, módulo 2: ortizf@cicese.mx
Osuna, Pedro, CICESE, Dep. Oceanografía Física, módulo 2: osunac@cicese.mx
Pallas, Enric, CICESE, Dep. Oceanografía Física, módulo 2: epallas@cicese.mx
Parés, Alejandro, CICESE, Dep. Oceanografía Física, módulo 2: apares@cicese.mx
Pavía, Edgar, CICESE, Dep. Oceanografía Física, módulo 2: epavia@cicese.mx
Pérez Brunius, Paula, CICESE, Dep. Oceanografía Física, módulo 2: brunius@cicese.mx
Pérez, Marco Antonio, CICESE, módulo 2: mperez@cicese.mx
Ramírez, Isabel, CICESE, Dep. Oceanografía Física, módulo 2: iramirez@cicese.mx
Ocampo, Francisco, CICESE, Dep. Oceanografía Física, módulo 2: Ocampo@cicese.mx
Turrent, Cuauhtémoc, CICESE, Dep. Oceanografía Física, módulo 2: Turrentc@cicese.mx
Vázquez, Rogelio, CICESE, Dep. Geofísica Aplicada, módulo 2: rvazquez@cicese.mx
Velasco, Oscar, CICESE, Dep. Oceanografía Física, módulo 2: ovelasco@cicese.mx
Vidal, Antonio, CICESE, Dep. Simología, módulo 2: vidalv@cicese.mx
Weber, Bodo, CICESE, Dep. Geología, módulo 2: bweber@cicese.mx
Wong, Víctor, CICESE, Dep. Simología, módulo 2: vwong@cicese.mx
Zavala Sansón, Luis, CICESE, Dep. Oceanografía Física, módulo 2: lzavala@cicese.mx

Módulo 3

Khomenko, Anatoly, CICESE, Depto. de Óptica, módulo 3: akhom@cicese.mx
Márquez Becerra, Heriberto, CICESE, Depto. de Óptica, módulo 3: hmarquez@cicese.mx
Méndez Méndez, Eugenio Rafael, CICESE, Depto. de Óptica, módulo 3: emendez@cicese.mx
Miridonov, Serguei, CICESE, Depto. de Óptica, módulo 3: mirsev@cicese.mx

Navarrete Alcalá, Alma Georgina, CICESE, Depto. de Óptica, módulo 3: gnavarre@cicese.mx
Negrete Regagnon, Pedro, CICESE, Depto. de Óptica, módulo 3: negrete@cicese.mx
O'Donnell, Kevin Arthur, CICESE, Depto. de Óptica, módulo 3: odonnell@cicese.mx
Rangel Rojo, Raúl, CICESE, Depto. de Óptica, módulo 3/6: rrangel@cicese.mx
Rocha Mendoza, Israel, CICESE, Depto. de Óptica, módulo 3: irocha@cicese.mx
Ruiz Cortes, Víctor, CICESE, Depto. de Óptica, módulo 3/6: vruizc@cicese.mx
Salazar Miranda, David, CICESE, Depto. de Óptica, módulo 3: davisac@cicese.mx
Shlyagin, Mikhail, CICESE, Depto. de Óptica, módulo 3/6: mish@cicese.mx
Stepanov, Serguei, CICESE, Depto. de Óptica, módulo 3: steps@cicese.mx
Tchaikina Kolesnikova, Elena, CICESE, Depto. de Óptica, módulo 3: chaikina@cicese.mx
Tentori Santacruz, Diana, CICESE, Depto. de Óptica, módulo 3/6: diana@cicese.mx

Módulo 6

Rangel Rojo, Raúl, CICESE, Depto. de Óptica, módulo 3/6: rrangel@cicese.mx
Ruiz Cortes, Víctor, CICESE, Depto. de Óptica, módulo 3/6: vruizc@cicese.mx
Shlyagin, Mikhail, CICESE, Depto. de Óptica, módulo 3/6: mish@cicese.mx
Tentori Santacruz, Diana, CICESE, Depto. de Óptica, módulo 3/6: diana@cicese.mx

CIDESI

Módulo 6

Alba, Diana Lucero, CIDESI, módulo 6: dalba@cidesi.mx
Bringas, Vicente, CIDESI, módulo 6: vbringas@cidesi.mx

CIMAT

Módulo 5

(Responsables de los grupos y áreas de investigación)

Botello Rionda, Salvador, CIMAT, Guanajuato, Coordinador del Departamento de Ciencias de la Computación, módulo 5: botello@cimat.mx
De la Peña, José Antonio, CIMAT, Guanajuato, Dirección General, módulo 5: jap@cimat.mx
Gamboa de Buen, Berta, CIMAT, Guanajuato, Coordinación Académica de Divulgación Científica, módulo 5: gamboa@cimat.mx
González Farias, Graciela, CIMAT, Guanajuato/Monterrey, Coordinación Académica de Vinculación y Servicios Tecnológicos, módulo 5: farias@cimat.mx
Hernández, Arturo, CIMAT, Guanajuato, Coordinación Académica de Formación de Recursos Humanos, módulo 5: artha@cimat.mx
Lemus Olalde, Cuauhtémoc, CIMAT, Zacatecas, módulo 5: clemola@cimat.mx
Pérez Abreu Carrión, Víctor, CIMAT, Guanajuato, Coordinador del Departamento de Probabilidad y Estadística, módulo 5: pabreu@cimat.mx
Petean Humen, Jimmy, CIMAT, Guanajuato, Coordinador del Departamento de Matemáticas Básicas, módulo 5: jimmy@cimat.mx
Rivera Meraz, Mariano, CIMAT, Guanajuato, Coordinación General de Investigación Científica, módulo 5: mrivera@cimat.mx
Sánchez Valenzuela, Adolfo, CIMAT, Mérida, módulo 5: adolfo@cimat.mx
Zuloaga Garmendia, María Antonieta, CIMAT, Aguascalientes, módulo 5: tony@cimat.mx

CIMAV

Módulo 4

Espinosa Magaña, Francisco, CIMAV, módulo 4: luis.fuentes@cimav.edu.mx
Fuentes Cobas, Luis Edmundo, CIMAV, módulo 4: francisco.espinosa@cimav.edu.mx
Matutes Aquino, José Andrés, CIMAV, módulo 4: jose.matutes@cimav.edu.mx
Olive Méndez, Sión Federico, CIMAV, módulo 4: sion.olive@cimav.edu.mx

CIO

Módulo 3

Aboites Manrique, Vicente, CIO, módulo 3: aboites@cio.mx
Alcala Ochoa, Noé, CIO, módulo 3: alon@cio.mx
Arzate Plata, Norberto, CIO, módulo 3: narzate@cio.mx
Barbosa García, J Oracio Cuahutémoc, CIO, módulo 3: barbosag@cio.mx
Barmenkov, Yury, CIO, módulo 3/6: yuri@cio.mx
Barrientos García, Bernardino, CIO, módulo 3: bb@cio.mx
Carriles Jaimes, Ramón, CIO, módulo 3/6: ramon@cio.mx
Castro Camus, Enrique, CIO, módulo 3: enrique@cio.mx
Cywiak Garbarcewicz, Moisés, CIO, módulo 3: moi@cio.mx
De la Rosa Cruz, Elder, CIO, módulo 3: elder@cio.mx
Desirena Enríquez, Haggeo, CIO, módulo 3: hagdes@cio.mx
Diaz Torres, Luis Armando, CIO, módulo 3: ditlacio@cio.mx
Espinosa Luna, Rafael, CIO, módulo 3: reluna@cio.mx
Flores Moreno, Jorge Mauricio, CIO, módulo 3: jmflores@cio.mx
Frausto Reyes, Claudio, CIO, módulo 3: cfraus@cio.mx
Hernández Montes, María del Socorro, CIO, módulo 3: mhernandez@cio.mx
Kiriyanov, Alexander, CIO, módulo 3/6: iryanov@cio.mx
López Luke, Tzarara, CIO, módulo 3: tzarara@cio.mx
Luna Moreno, Donato, CIO, módulo 3: dluna@cio.mx
Maldonado Rivera, José Luis, CIO, módulo 3: jlmr@cio.mx
Martínez Gamez, Ma Alejandrina, CIO, módulo 3: mamg@cio.mx
Martínez Rios, Alejandro, CIO, módulo 3/6: amr6@cio.mx
Mejía Beltrán, Efraín, CIO, módulo 3/6: emejiab@cio.mx
Mendoza Santoyo, Bernardo, CIO, módulo 3: bms@cio.mx
Mendoza Santoyo, Fernando, CIO, módulo 3: fmendoza@cio.mx
Meneses Nava, Marco Antonio, CIO, módulo 3, tono@cio.mx
Minkovich, Uladimir, CIO, módulo 3, vladimir@cio.mx
Monzón Hernández, David, CIO, módulo 3: dmonzon@cio.mx
Pichardo Molina, Juan Luis, CIO, módulo 3/6: jpichardo@cio.mx
Pisarchik, Alexander, CIO, módulo 3: apisarch@cio.mx
Pottiez Olivier, Jean Michel, CIO, módulo 3/6: pottiez@cio.mx
Ramos Ortiz, Gabriel, CIO, módulo 3: garamoso@cio.mx
Torres Gomez, Ismael, CIO, módulo 3/6: itorres@cio.mx
Vázquez García, Gloria Veronica, CIO, módulo 3: gvvazquez@cio.mx
Veazquez Nava, Raúl Alfonso, CIO, módulo 3: alfonso@cio.mx
Villa Villa, Francisco, CIO, módulo 3: fvilla@cio.mx

Módulo 6

Barmenkov, Yury, CIO, módulo 3/6: yuri@cio.mx
Carriles Jaimes, Ramón, CIO, módulo 3/6: ramon@cio.mx
Kiriyanov, Alexander, CIO, módulo 3/6: iryanov@cio.mx
Martínez Rios, Alejandro, CIO, módulo 3/6: amr6@cio.mx
Mejía Beltrán, Efraín, CIO, módulo 3/6: emejiab@cio.mx
Páez, Gonzalo, CIO, módulo 6: gpaez@cio.mx
Pichardo Molina, Juan Luis, CIO, módulo 3/6: jpichardo@cio.mx
Pottiez Olivier, Jean Michel, CIO, módulo 3/6: pottiez@cio.mx
Strojnik Pogacar, Marija, CIO, módulo 6: marias@cio.mx
Torres Gomez, Ismael, CIO, módulo 3/6: itorres@cio.mx

INAOE

Módulo 1

Aretxaga, Itziar, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1: itziar@inaoep.mx
Bertone, Emanuele, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1: ebertone@inaoep.mx
Carramiñana, Alberto, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1: alberto@inaoep.mx
Carrasco, Luis, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1: carrasco@inaoep.mx
Chávez, Miguel, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1: mchavez@inaoep.mx
Chavushyan, Vahram, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1: vahram@inaoep.mx
Corona, Manuel, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1: mcorona@inaoep.mx
Del Burgo, Carlos, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1/6: cburgo@inaoep.mx
Gómez, Arturo Iván, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1: aigomez@inaoep.mx
Guichard, José, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1: jguich@inaoep.mx
Hughes, David, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1/6: dhughes@inaoep.mx
León, Jonathan, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1: leon.tavares@inaoep.mx
Longinotti, Anna Lia, Coord. astrofísica, módulo 1: annalia@inaoep.mx
López Cruz, Omar, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1/6: omarlx@inaoep.mx
Mayya, Divakara, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1: ydm@inaoep.mx
Mendoza, Eduardo, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1: mend@inaoep.mx
Montaña, Alfredo, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1: amontana@inaoep.mx
Mújica, Raúl, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1: rmujica@inaoep.mx
Porrás, Alicia, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1: porras@inaoep.mx
Puerari, Ivánio, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1: puerari@inaoep.mx
Recillas, Elsa, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1: recillas@inaoep.mx
Rodríguez, Mónica, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1: mrodri@inaoep.mx
Rodríguez, Lino, INAOE, Coord. Astrofísica, módulo 1: lino@inaoep.mx
Rosa, Daniel, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1: danrosa@inaoep.mx
Rosales, Fabián, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1: frosales@inaoep.mx
Silich, Sergiy, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1: silich@inaoep.mx
Tenorio Tagle, Guillermo, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1: gtt@inaoep.mx
Terlevich, Elena, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1: eterlevi@inaoep.mx
Terlevich, Roberto, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1: rjt@inaoep.mx
Torres, Ibrahim, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1: ibrahim@inaoep.mx
Valdés, Jose Ramón, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1: jvaldes@inaoep.mx
Vega, Olga, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1: ovega@inaoep.mx
Velázquez, Miguel, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 6: miyang@inaoep.mx
Wall, William, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1: wwall@inaoep.mx

Módulo 3

Arrizón Peña, Víctor Manuel, INAOE, Coord. óptica, módulo 3: arrizon@inaoep.mx
Báez Rojas, José Javier, INAOE Coord. óptica, módulo 3: jbaezr@inaoep.mx
Berriel Valdós, Luis Raúl, INAOE, Coord. óptica, módulo 3: berval@inaoep.mx
Carranza Gallardo, Jazmín, INAOE, Coord. óptica, módulo 3: jazmin@inaoep.mx
Chávez Cerda, Sabino, INAOE, Coord. óptica, módulo 3: sabino@inaoep.mx
Comejo Rodríguez, Alejandro, INAOE, Coord. óptica, módulo 3/6: acornejo@inaoep.mx
Cosme Bolaños, Ismael, INAOE, Coord. óptica, módulo 3: ismaelcb@inaoep.mx
Durán Sánchez, Manuel, INAOE, Coord. óptica, módulo 3: manueld@inaoep.mx
Granados, Agustín Fermín Salomón, INAOE, Coord. óptica, módulo 3/6: fermin@inaoep.mx
Gutiérrez Martínez, Celso, INAOE, Coord. óptica, módulo 3/6: cgutz@inaoep.mx
Ibarra Escamilla, Baldemar, INAOE, Coord. óptica, módulo 3: baldemar@inaoep.mx
Iturbe Castillo, Marcelo David, INAOE, Coord. óptica, módulo 3: diturbe@inaoep.mx
Korneev Zabello, Nikolai, INAOE, Coord. óptica, módulo 3: korneev@inaoep.mx
Kuzin, Evgeny, INAOE, Coord. óptica, módulo 3: ekuz@inaoep.mx
Mansurova Svetlana, INAOE, Coord. óptica, módulo 3: smansur@inaoep.mx
Martínez Niconoff, Gabriel, INAOE, Coord. óptica, módulo 3: gmartin@inaoep.mx
Moya Cessa, Héctor Manuel, INAOE, Coord. óptica, módulo 3: hmmc@inaoep.mx
Muñoz López, Javier, INAOE, Coord. óptica, módulo 3: jmunoz@inaoep.mx
Olivares Pérez, Arturo, INAOE, Coord. óptica, módulo 3: olivares@inaoep.mx
Porrás Aguilar, Rosario, INAOE, Coord. óptica, módulo 3: rporras@inaoep.mx
Ramírez San Juan, Julio César, INAOE, Coord. óptica, módulo 3: jcram@inaoep.mx
Ramos García, Rubén, INAOE, Coord. óptica, módulo 3: rgarcia@inaoep.mx
Rodríguez Lara, Blas Manuel, INAOE, Coord. óptica, módulo 3: bmlara@inaoep.mx
Rodríguez Montero, Ponciano, INAOE, Coord. óptica, módulo 3: ponciano@inaoep.mx
Ruíz Corona, Ulises, INAOE, Coord. óptica, módulo 3: uruiz@inaoep.mx
Sánchez de la Llave, Julián David, INAOE, Coord. óptica, módulo 3: dsanchez@inaoep.mx
Sánchez Mondragón, José Javier, INAOE, Coord. óptica, módulo 3: jsanchez@inaoep.mx
Shcherbakov, Alexander, INAOE, Coord. óptica, módulo 3: alex@inaoep.mx
Soto Eguibar, Francisco, INAOE, Coord. óptica, módulo 3: feguibar@inaoep.mx
Tepichín Rodríguez, Eduardo, INAOE, Coord. óptica, módulo 3: tepichin@inaoep.mx
Treviño Palacios, Carlos Gerardo, INAOE, Coord. óptica, módulo 3: carlost@inaoep.mx
Urcid Serrano, Gonzalo, INAOE, Coord. óptica, módulo 3: gurcid@inaoep.mx

Módulo 5

Carrasco, Ariel, INAOE, Coord. CC computacionales, módulo 5: ariel@inaoep.mx
González, Jesús A., INAOE, Coord. CC computacionales, módulo 5: jagonzalez@inaoep.mx
Martínez Trinidad, J.F., INAOE, Coord. CC computacionales, módulo 5: fmartine@inaoep.mx
Morales, Eduardo, INAOE, Coord. CC computacionales, módulo 5: emorales@inaoep.mx

Módulo 6

Aguilar, Félix, INAOE, Coord. óptica, módulo 6: faguilar@inaoep.mx
Avilés Urbiola, Jose Luis, INAOE Coord. astrofísica, módulo 6: aviles@inaoep.mx
Carrasco, Esperanza, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 6: bec@inaoep.mx
Castillo, Edgar, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 6: cade@inaoep.mx
Castro, Jorge, INAOE, Coord. óptica, módulo 6: jcastro@inaoep.mx
Comejo Rodríguez, Alejandro, INAOE, Coord. óptica, módulo 3/6: acornejo@inaoep.mx
de la Hidalga, Javier, INAOE, Coord. electrónica, módulo 6: jhidalga@inaoep.mx

Del Burgo, Carlos, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1/6: cburgo@inaoep.mx
Ferrusca, Daniel, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 6: dferrus@inaoep.mx
Gale, David, INAOE, Coord. óptica, módulo 6: dgale@inaoep.mx
Granados, Agustín Fermín Salomón, INAOE, Coord. óptica, módulo 3/6: fermin@inaoep.mx
Gutiérrez Martínez, Celso, INAOE, Coord. óptica, módulo 3/6: cgutz@inaoep.mx
Hughes, David, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1/6: dhughes@inaoep.mx
Jaramillo, Alberto, INAOE, Coord. óptica, módulo 6: ajaramil@inaoep.mx
Kosarev, Andrei, INAOE, Coord. electrónica, módulo 6: akosarev@inaoep.mx
López Cruz, Omar, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1/6: omarlx@inaoep.mx
Luna, Abraham, INAOE, Coord. astrofísica, módulo 1/6: luna@inaoep.mx
Moreno, Mario, INAOE, Coord. Electrónica, módulo 6: mmoreno@inaoep.mx
Percino, Elizabeth, INAOE, Coord. óptica, módulo 6: epercino@inaoep.mx
Renero, Francisco, INAOE, Coord. óptica, módulo 6: paco@inaoep.mx
Torres, Alfonso, INAOE, Coord. electrónica, módulo 6: atorres@inaoep.mx

IPICYT

Módulo 4

Encinas, Armando, IPICYT, módulo 4: armando.encinas@ipicyt.edu.mx
Flores Zúñiga, Horacio, IPICYT, módulo 4: horacio.flores@ipicyt.edu.mx
López Sandoval, Román, IPICYT, módulo 4: sandov@ipicyt.edu.mx
López Urías, Florentino, IPICYT, módulo 4: flo@ipicyt.edu.mx
Morán López, José Luis, IPICYT, módulo 4: joseluis.moran@ipicyt.edu.mx
Ríos Jara, David, IPICYT, módulo 4: david.rios@ipicyt.edu.mx
Rodríguez González, Vicente, IPICYT, módulo 4: vicente.rdz@ipicyt.edu.mx
Rodríguez López, José Luis, IPICYT, módulo 4: jlrz@ipicyt.edu.mx
Rosu Barbus, Haret C., IPICYT, módulo 4: hcr@ipicyt.edu.mx
Sánchez Llamazares, José Luis, IPICYT, módulo 4: jose.sanchez@ipicyt.edu.mx

13. Propuesta de conformación de Comité Científico

(Se marcan con * los pendientes de confirmación, todos en grupos de trabajo del PILA, e incluidos en el directorio de la sección 12)

- Itziar Aretxaga, INAOE, Puebla.
- Vicente Bringas*, CIDESI, Querétaro.
- Esperanza Carrasco, INAOE, Puebla.
- Raúl Castro Escamilla, CICESE, Baja California.
- José Andrés Matutes Aquino*, CIMAV, Chihuahua.
- Eugenio Méndez, CICESE, Baja California.
- Bernardo Mendoza Santoya*, CIO, Guanajuato.
- Jose Luis Morán López, IPICYT, San Luis Potosí.

- Adolfo Sánchez Valenzuela, CIMAT, Yucatán

14. Propuesta de conformación de Comité de Usuarios

(Se marcan con * los pendientes de confirmación)

Los componentes están seleccionados como exponentes de la comunidad nacional especializados en los problemas nacionales y en las aplicaciones de la ciencia básica a la educación, divulgación, a la derrama tecnológica y aplicaciones industriales de desarrollos futuros, y los que están pendientes de las necesidades de tecnología de las fronteras de la ciencia básica para producir los nuevos saltos tecnológicos comercializables y extrapolables a otras líneas de producción. Se incluye una larga lista de potenciales miembros y se marca con + las 10 personas que inicialmente se podrían invitar, presentando un balance entre miembros provenientes de los sectores de investigación, educación, gobierno y empresa.

- (+) Rocío Isabel Labastida Gómez de la Torre*, Asociación Mexicana de Museos y Centros de Ciencia y Tecnología, presidenta: rocio.labastida@ccs.net.mx
- Manuel Grajales*, Instituto Mexicano del Petróleo, investigador: mgrajal@imp.mx.
- Eduardo Hernández*, Planetario de Torreón, director; Asociación Mexicana de Planetarios A.C. AMPAC, presidente: eduardo@planetariumtorreon.com
- (+) Álvaro López Espinosa*, Secretaría de Educación Pública, Dirección General de Educación Superior para Profesionales de la Educación, director: alvaro.lopez@sep.gob.mx
- Martín Montero*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, especialista: martin_montero@tlaloc.imta.mx
- Jorge Padilla*, Sociedad Mexicana para la Divulgación de la Ciencia y la Técnica, A.C. (SOMEDICyT), presidente: jorge.padilla@somedicyt.org.mx
- Claudia Reyes*, Consejo Nacional para la Cultura y las Artes (Conaculta, Dirección de Promoción Editorial y Fomento a la Lectura: creyest@conaculta.gob.mx
- (+) Jaime Urrutia Fucugauchi*, Instituto de Geofísica, UNAM, investigador, Colegio Nacional, miembro; Academia Mexicana de Ciencia, presidente: juf@geofisica.unam.mx
- (+) Carlos Valdés González*, CENAPRED, director general: cvaldesg@cenapred.unam.mx
- Enrique Villegas Valladares*, Consejos Estatales de Ciencia, presidente: enrique.villegas@copocyt.gob.mx
- Javier Mendieta*, Agencia Espacial Mexicana, director: Mendieta.javier@aem.gob.mx
- (+) María Esther Brandan*, investigadora del Instituto de Física de la UNAM, ex-presidente de la División de Física Médica, Sociedad Mexicana de Física, brandan@fisica.unam.mx
- (+) Jorge Gutiérrez de Velasco Rodríguez*, Universidad Aeronáutica en Querétaro, Rector rectoria@unaq.edu.mx

- Mario Almela*, Texas Instrument, Gerente Regional México de Semiconductores, <https://mx.linkedin.com/in/marioalmela/en>
- (+) Jesús Palomino Echartea*, Gerente General del GDC, Centro de Diseño de Intel en Guadalajara, <https://mx.linkedin.com/in/jesus-palomino-echartea-4777305>
- (+) María Verónica Orendain de los Santos*, Secretaría de Economía, Directora General de Industrias Pesadas y Alta Tecnología, maria.orendain@economia.gob.mx
- (+) Armando Paredes Arrollo Loza*, Consejo Coordinador Empresarial, presidente de la Comisión de competitividad y productividad, apal@infosel.net.mx
- (+) Carlos Arnoldo Morales Gil*, PEMEX, Director general de Exploración y Producción carlos.morales@pemex.com