

AVANCES EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA PROPICIADOS POR LOS PROYECTOS HIDROELÉCTRICOS

**Se agradece la contribución de algunos especialistas
que permitieron elaborar apartes del texto siguiente**

**Con actualización en
septiembre de 2014**

Los proyectos hidroeléctricos han impulsado en forma notable el avance de la cultura científica y técnica en el medio. En efecto, numerosas disciplinas y profesiones concurren en los estudios de reconocimiento, prefactibilidad y factibilidad, así como en el diseño, la construcción y la operación de dichos proyectos. A lo largo de aproximadamente un siglo se han dado en Colombia y Antioquia procesos de transferencia y apropiación de tecnología, así como desarrollos propios que son producto de la capacitación del talento nacional.

El gran desarrollo que la hidroelectricidad ha tenido en Colombia y en Antioquia pone de presente la calidad que han alcanzado los especialistas, profesionales, empleados y obreros que han participado en una actividad tan importante para el bienestar y progreso del país.

A continuación se esbozan brevemente algunos elementos del mencionado avance, en una primera aproximación a un tema que requiere mayor complementación, profundización y detalle.

CLIMATOLOGÍA - HIDROLOGÍA

Mucho se ha avanzado en el conocimiento de los regímenes hidrológicos tropicales de interés en Colombia y en Antioquia. Particular mención merecen los largos estudios llevados a cabo en el programa de posgrado en aprovechamiento de recursos hidráulicos, de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, sobre caudales máximos y mínimos, así como la influencia del fenómeno El Niño en la hidrología colombiana.

Vale la pena resaltar una importante culminación de los trabajos anteriores cuando se da a conocer el Atlas Hidrológico de Colombia, mediante el cual con ayuda de un programa de computador es posible cuantificar el recurso hídrico en cualquier sitio de país, incluso donde no se poseen registros históricos, con lo cual es posible prever los riesgos de inundaciones y sequías. Esta importante contribución estuvo a cargo de los profesores Germán Poveda Jaramillo, Jaime Ignacio Vélez y Oscar Mesa Sánchez, acompañados por un nutrido grupo de estudiantes, y ella mereció el importante reconocimiento de la Fundación Alejandro Ángel Escobar en la categoría Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible correspondiente al año 2007.

Los estudios sobre el fenómeno El Niño, llevados a cabo por profesores y estudiantes del programa de posgrado ya mencionado, han permitido una interlocución con universidades y agencias de investigación de carácter internacional. En particular, el profesor Poveda Jaramillo recibió en 1999 otro galardón de la mencionada Fundación, esta vez en la categoría de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, con el trabajo titulado Retroalimentación dinámica entre el Fenómeno El Niño /Oscilación del Sur y la hidrología de Colombia.

Es imprescindible destacar el trabajo institucional realizado por firmas consultoras como Integral y Sedic, y muy en especial el de las entidades estatales Empresas Públicas de Medellín, ISA e ISAGEN, en el campo de los regímenes pluviales y fluviales de Antioquia, así como en lo relativo a la producción y transporte de sedimentos, con énfasis en las implicaciones de su depósito en embalses. Un año después de la fundación de las Empresas Públicas de Medellín, en 1956, se creó allí la sección de hidrología con el fin de instalar y mantener la red hidrométrica, así como procesar, validar y conservar la información hidrometeorológica requerida por la entidad. Cincuenta años más tarde se contaba con una red de 198 estaciones que es utilizada, entre otros fines, para el planeamiento de nuevos proyectos de generación de energía, la operación de las centrales existentes y la comercialización de energía en la bolsa.

Es apropiado concluir lo anterior destacando la gran utilidad de los datos de las estaciones de medida y de los correspondientes análisis estadísticos y probabilísticos llevados a cabo por las entidades antes indicadas. Indudablemente ello se ha reflejado en un planeamiento, diseño y operación de los proyectos hidroeléctricos que se ha caracterizado por el mayor y mejor aprovechamiento del recurso agua en la generación eléctrica.

Los estudios hidrológicos también deben ocuparse de las propiedades físicas y químicas del agua, y en el caso de los proyectos hidroeléctricos ello ha cobrado en Antioquia particular importancia con respecto a los fenómenos de eutroficación y sedimentación. Lo primero tiene que ver con la calidad del agua que los embalses suministran a las conducciones y turbinas de la central, en tanto que lo segundo con la vida útil de los mismos.

GEOLOGÍA

Conocimiento geológico regional. La construcción de las centrales tuvo un efecto positivo sobre el conocimiento geológico local y subregional. Puede señalarse que el Servicio Geológico Nacional publicó tres informes al respecto entre 1940 y 1960.

Ingeniería geológica. Si bien el Batolito Antioqueño, en estado de roca fresca, ofrece excelentes características geotécnicas, su descomposición por efecto de la meteorización química da lugar a saprolitos de gran espesor. Como consecuencia de la mala calidad geotécnica de dichos saprolitos, se ha optado por excavar túneles y cavernas en la roca fresca con el fin de ubicar las centrales hidroeléctricas. Ello ha resultado en el mejoramiento de los conocimientos en mecánica de rocas, geotecnia de macizos rocosos, etc.

Determinación del riesgo sísmico. Las entidades financiadoras internacionales de obras hidroeléctricas (BM, BID, etc.) empezaron, desde la década de 1970, a exigir estudios sobre el riesgo sísmico de los lugares donde se construyen las presas y se llenan los embalses. El resultado fue la contratación de empresas consultoras como Woodward Clyde, que trajeron a Colombia geólogos especialistas en neotectónica y en geología del Cuaternario que fueron a trabajar con empresas consultoras locales como Integral y Sedic. Ahí se formaron numerosos ingenieros geólogos y geólogos colombianos. Además se le dio un gran impulso a los conocimientos sobre la evolución reciente de las cordilleras colombianas, como lo demuestran los trabajos presentados en el Primer Seminario sobre el Cuaternario de Colombia realizado en Bogotá en 1980.

Tasas de denudación. La preocupación por la vida útil de los embalses también fomentó las investigaciones acerca de la erosión en las cuencas que los alimentan, estudios que han seguido hasta la actualidad (Hermelin, 1983, 1984, 1992; Posada et al., 2003; Villegas, 1984).

Geomorfología regional. ISA contrató en 1981 con la Universidad Nacional - Sede Medellín, la realización del estudio geomorfológico de la zona de influencia de los embalses de Oriente, que permitió un conocimiento a escala semidetallada de las geoformas y procesos de la región (Hermelin et al., 1983).

Fenómenos catastróficos. El aguacero torrencial caído en las cabeceras del río San Carlos el 21 de Septiembre de 1990 destruyó parte de la central Calderas y motivó una serie de trabajos acerca de las consecuencias de ese evento catastrófico (Hermelin, 1991, 1992, 1992a, Hermelin et al., 1991), desafortunadamente seguido por muchos otros eventos.

Otros temas relacionados. En forma indirecta también se han generado a partir de las cuencas con represas aportes en temas como la circulación de aguas subterráneas en los macizos ígneo metamórficos (Hermelin et al, 1988), las tasas de meteorización química (Hermelin & Geale, 1988; García & Hermelin, 2004) y la evolución de los paisajes de los altiplanos antioqueños.

INGENIERÍA

De mucha importancia ha sido la participación de diferentes ramas de la ingeniería como civil, eléctrica, mecánica, forestal y de sistemas en el diseño y construcción de obras civiles, así como en el montaje de estructuras y maquinarias complejas, estos últimos que hoy pueden ser llevados a cabo en su totalidad por personal nacional.

Se menciona en especial:

Presas de suelo. Los suelos residuales profundos son preponderantes en la región central de Antioquia, donde se localizan varios de los proyectos hidroeléctricos importantes. Cuando se iniciaron estas obras no había buen conocimiento del comportamiento de estos suelos, porque los desarrollos técnicos, preponderantemente en Europa y Norteamérica, se habían hecho sobre los suelos transportados y sedimentarios. Fue necesario investigar y

diseñar las estructuras para las condiciones de estos suelos de alta humedad natural, alta porosidad y con comportamiento de suelos preconsolidados.

Diseño sísmico de presas. Luego se desarrollaron las investigaciones y diseño sísmico de presas construidas con los suelos anteriores, sobre lo que no se tenía conocimiento previo. Es importante mencionar la participación del Ing. Ignacio Arango Greiffenstein, quien actualmente reside en California. El diseño y la construcción de estructuras antisísmicas hace ya parte de la cultura asociada con los proyectos hidroeléctricos.

Presas de concreto compactado (CCR). Este tema se inició en varios países en la década del ochenta. La aplicación más importante de presas de CCR con alto contenido de pasta y gran volumen, unos 1,4 millones de m³, se hizo en el caso de Porce II. Esto requirió la fabricación de instrumentos de laboratorio complejos y la investigación del efecto de la meteorología tropical en la construcción y control de calor de estas presas.

Túneles. Los túneles en estos terrenos deben penetrar a través de gruesas capas de suelos residuales y saprolitos, en condiciones de alta humedad y baja resistencia al cortante. Para atender estas situaciones se han desarrollado técnicas constructivas sui-géneris, adaptando metodologías desarrolladas en otros países.

Construcción. Importantes firmas del concierto internacional, en consorcio con firmas nacionales, han obtenido mediante licitación contratos para construir los grandes proyectos hidroeléctricos de Antioquia. Puede decirse que el talento y conocimiento nacional está preparado desde hace varios años para acometer por su cuenta la construcción de dichas obras, pero ello no ha sido posible por falta de la capacidad financiera requerida.

La complejidad de los proyectos ha exigido el uso de avanzadas técnicas de construcción adaptadas a las condiciones de la región. Los resultados son por lo general muy satisfactorios. Un hecho merece destacarse en el panorama de las grandes obras públicas del país: algunos proyectos de las Empresas Públicas de Medellín han terminado costando menos de lo presupuestado y en plazo inferior a lo previsto.

Líneas de transmisión. La extensa red de líneas de alta tensión que cubre buena parte del territorio colombiano es el resultado de un gran progreso en el planeamiento, diseño y operación que exige dicha red. Puede destacarse lo relativo a la optimización, protección y estabilidad, así como los estudios que han llevado a un mayor conocimiento y caracterización de los niveles cerámicos en el país. Este último aspecto es importante en el diseño de las líneas de transmisión pues en Colombia son extraordinariamente comunes las descargas atmosféricas.

HIDRÁULICA

Dado que es fundamental conocer el comportamiento del agua en las diferentes estructuras de un proyecto hidroeléctrico con el fin de prever la operación y elaborar el diseño de éstas, significativo ha sido el impulso que han recibido los estudios teóricos y experimentales sobre el movimiento del agua en ríos, canales, túneles, tuberías, embalses, vertederos y descargas. En atención a los graves problemas de erosión en las regiones montañosas de

Antioquia, los trabajos anteriores han requerido muchas veces tener en cuenta la producción, transporte y depósito de diferentes tipos de sedimento. Un resultado adicional ha sido el impulso recibido por la docencia y la experimentación relacionada con la mecánica de fluidos.

Una herramienta útil para el trabajo anterior lo constituyen los modelos reducidos. La Facultad de Minas fue pionera en el estudio del comportamiento de grandes estructuras de los proyectos hidroeléctricos mediante el uso de modelos reducidos de las mismas. La interpretación de los resultados obtenidos con estos modelos a escala permite deducir el comportamiento de los prototipos. Al frente de esos estudios estuvo principalmente el profesor Rodrigo Cano Gallego.

INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES Y ESTADÍSTICA

En muchos momentos de la evaluación, diseño y operación de los proyectos hidroeléctricos se hace necesaria la aplicación de principios y técnicas de probabilidad y estadística. Lo cual es consecuencia, entre otros aspectos, del riesgo y la incertidumbre asociados con ocurrencias hidrológicas, las demandas futuras de energía y potencia, el estado de embalses y plantas del sistema interconectado nacional, eventuales situaciones macroeconómicas y beneficios y costos futuros.

Existe un área de trabajo que ha colocado al país en un punto muy alto en el concierto internacional, seguramente no la única pero que se señala en razón de su importancia nacional y regional. Se trata de los métodos muy elaborados utilizados por el sector eléctrico para el planeamiento de la expansión y para el planeamiento de la operación del sistema eléctrico nacional, en especial por parte de la antigua Interconexión Eléctrica S. A. (ISA) y las Empresas Públicas de Medellín, con la sustancial contribución de la consultoría nacional e internacional y con estudios adelantados por la Facultad de Minas. Se ha utilizado allí un amplio repertorio de modelos probabilísticos para las series de tiempo hidrológicas, entre los cuales podría mencionarse aquellos de memoria larga y los de desagregación. También merece señalarse el uso de la simulación de sistemas al igual que de avanzadas técnicas de programación matemática, tal el caso de la optimización no determinística, en particular relacionada con el uso de la programación dinámica estocástica. En el caso de un proyecto individual, lo anterior permite estimar la energía y la confiabilidad con que ella podrá entregarse al sistema interconectado nacional, la potencia que puede suministrarse al mismo y las fechas apropiadas para la entrada del proyecto.

Dos modelos hidrológicos de carácter probabilístico asociados con colombianos han merecido la atención internacional: uno de memoria larga que contó con la participación de José Manuel Mejía y otro para la desagregación de series hidrológicas que tuvo la coautoría de Darío Valencia Restrepo.

SISTEMAS

La ingeniería de sistemas ha hecho una contribución fundamental en lo que respecta a la elaboración de programas especializados, así como a la organización y sistematización de

la información. Es del caso destacar los programas orientados a la operación de embalses, y también aquellos elaborados para el planeamiento de la expansión y el planeamiento de la operación de proyectos hidroeléctricos y termoeléctricos, para lo cual se aplican las técnicas de optimización y simulación de sistemas indicadas en el apartado anterior. Así mismo, han sido necesarios programas para el manejo de la información, especialmente la de carácter hidrológico.

De otra parte, se han llevado a cabo modernas aplicaciones en telemedición que permiten a los centros de control adoptar decisiones óptimas para la operación remota de embalses, plantas y circuitos de transmisión y distribución. Ello ha hecho necesaria la participación tanto de la ingeniería electrónica como la de sistemas.

GEOGRAFÍA

Los estudios previos a la realización de un proyecto exigen, han estimulado y proporcionado un mayor conocimiento del territorio antioqueño, ya que es necesario describir, apreciar y cuantificar, entre otros, aspectos relacionados con la orografía, la hidrografía, la vegetación, la geología, los suelos, la economía y el poblamiento.

Como resultado de dichos estudios y en particular mediante el apoyo de los servicios de cartografía y aerofotogrametría del meritorio Instituto Geográfico Agustín Codazzi, se ha obtenido información y mapas muy detallados para la zona de los diversos proyectos en lo tocante a cobertura vegetal, uso del suelo, propiedades del subsuelo, topografía, corrientes de agua, climatología, distribución espacial de la población, modos de producción...

ARQUEOLOGÍA

Un caso reciente y digno de mención tiene que ver con el proyecto Porce II de las Empresas Públicas de Medellín. Dice esta entidad que se procuró el rescate de evidencias materiales de sociedades aborígenes que en épocas prehispánicas ocuparon la zona del proyecto y que constituyen un bien cultural cuyo estudio hará posible la reconstrucción histórica de esas comunidades. Para ello la entidad contrató con la Universidad de Antioquia un programa arqueológico de rescate mediante el cual se identificaron los yacimientos existentes en el lugar, se evaluó su importancia y se rescató los diversos vestigios arqueológicos. En los numerosos yacimientos identificados se han hallado vestigios pertenecientes a cuatro culturas que ocuparon ese territorio desde siete mil años atrás hasta la época de la conquista española.

ECOLOGÍA

En la década de los setenta, las Empresas Públicas de Medellín iniciaron la aplicación de estudios de impacto ambiental en el desarrollo del río Nechí. En ese entonces apenas se estaban esbozando las metodologías al respecto. En la actualidad se llevan a cabo completos estudios físicos, bióticos y antrópicos con el fin de mitigar o compensar los efectos negativos de las obras sobre el hábitat. La larga tradición en la protección forestal y el manejo de cuencas de aquella entidad ha constituido un modelo reconocido en el país;

debe destacarse la participación de la ingeniería forestal en la cuenca Piedras Blancas, muy útil por su aprovechamiento como experiencia piloto.

Un ejemplo reciente lo constituye lo realizado por las Empresas Públicas de Medellín con respecto al futuro proyecto Porce III. La identificación y evaluación de impactos del proyecto se realizó mediante el análisis de las características actuales del ambiente en sus dimensiones física, biótica y social, sobrepuestas con las del proyecto en sus etapas de construcción y operación. El análisis permitió proyectar en tiempo y espacio las condiciones ambientales de la zona con y sin proyecto.

Es de interés también citar los estudios ambientales efectuados con motivo de los pequeños proyectos La Vuelta y La Herradura situados en el noroeste de Antioquia. Se hizo una caracterización y descripción detallada de los recursos de fauna y flora de la región, lo cual fue seguido de un plan de manejo ambiental con el fin de prevenir, corregir, mitigar o compensar los impactos negativos y potenciar los positivos.

SOCIOLOGÍA Y TRABAJO SOCIAL

Gracias a la experiencia adquirida por las Empresas Públicas de Medellín, en especial por las grandes dificultades derivadas de la inundación de la antigua población de El Peñol, se vienen llevando a cabo estudios e intervenciones muy completas en las comunidades afectadas por las obras de los proyectos. En diversos casos se han establecido relaciones respetuosas, comprensivas y participativas con dichas comunidades, lo cual ha permitido tener en cuenta tradiciones, valores y modos de producción con el fin atenuar los efectos negativos que se derivan de un desplazamiento.

En el caso del proyecto Porce III de las Empresas Públicas de Medellín, la caracterización socioeconómica e identificación de los impactos sobre la población del área de influencia directa, realizada en desarrollo del proceso de consulta con la comunidad y a partir de la investigación en fuentes secundarias diversas, fue realizada por dimensiones que atienden criterios ambientales, sociales y técnicos. Estas dimensiones son: espacial, demográfica, económica, cultural y político organizativa.

ECONOMÍA Y MERCADOS

Existe en la actualidad un mercado nacional de energía en donde se llevan a cabo operaciones de compra y venta de energía tanto en el corto plazo (horario) como en el largo plazo (hasta dos años), lo cual obliga a efectuar análisis de series de tiempo, pronósticos y análisis de riesgo, en particular con respecto a las implicaciones económicas y financieras.

La energía puede ser transada entre generadores y comercializadores a través de transacciones de corto plazo y mediante la firma de contratos bilaterales, ya sea por licitación pública o por negociación directa.

Los comercializadores de energía que representan clientes regulados (pequeños consumidores) están obligados a hacer la compra de energía a través de licitación pública, de tal forma de que se garantice un proceso transparente y de menor precio. Por otra parte,

los clientes clasificados como no regulados (grandes y medianos consumidores) pueden negociar en forma directa el precio de la energía con cualquier comercializador.

La bolsa de energía es un sistema de información en el cual los generadores y comercializadores del mercado de energía mayorista realizan las transacciones de electricidad, mediante las ofertas de precios, la disponibilidad de los recursos de generación y las demandas de energía de los comercializadores. Dichas transacciones se hacen en forma directa en la bolsa o a través de contratos. Así se obtiene el resultado económico de cada agente participante.

De otra parte, intenso ha sido el uso de la economía en la evaluación social, económica y financiera de los proyectos hidroeléctricos. Los enormes recursos en juego cuando de un gran proyecto se trata exigen un tratamiento cuidadoso de los beneficios directos e indirectos que se derivan del mismo, así como los costos de diverso orden en que se incurre y la capacidad financiera de la empresa dueña del emprendimiento. En particular, la lenta recuperación del capital invertido exige un análisis de fondo de los recursos de crédito que son indispensables para el éxito del proyecto.

Tratamiento cuidadoso han recibido en el país los regímenes tarifarios y las fórmulas correspondientes, como ocurre en caso del servicio eléctrico, con el fin de definir una estructura que no comprometa la estabilidad financiera de las entidades prestadoras de dicho servicio y que a la vez consulte la capacidad de pago de los usuarios. De interés son los estudios efectuados para estimar la capacidad redistributiva de una estructura tarifaria basada en tarifas diferenciales según los estratos socioeconómicos de los consumidores.

GESTIÓN DE PROYECTOS

Dada la complejidad de los proyectos se han establecido técnicas de gerencia de proyectos que permiten controlar los costos, programas y resultados de los proyectos en forma sistemática, atendiendo debidamente indicadores de gestión. Esto se ha desarrollado como una cultura que se ha extendido a otras áreas. En este campo se requirieron adaptaciones para las condiciones locales.

MATEMÁTICA

Casi todos los aspectos científicos y profesionales antes descritos requieren el lenguaje, los conocimientos y los procedimientos de la matemática, particularmente de áreas como geometría, álgebra, análisis, ecuaciones diferenciales, teoría de probabilidad y estadística, métodos numéricos y, en general, las llamadas matemáticas aplicadas. Dos resultados dignos de mención tienen que ver con el interés de diferentes profesionales por estas áreas y con la modernización de los estudios y aplicaciones de ciencias de la ingeniería como hidráulica, estructuras y electricidad.

ASPECTOS JURÍDICOS

Los servicios públicos domiciliarios, entre los cuales se encuentra el de energía eléctrica, tienen un importante tratamiento constitucional en la carta aprobada por la asamblea

nacional constituyente de 1991. Con posterioridad, en 1994, se aprobaron la ley 142 sobre dichos servicios en general y la 143 que se ocupa de asuntos exclusivos a la electricidad. Los grandes cambios introducidos en ese momento llevaron a crear una comisión de regulación de energía y gas (CREG), un ente de control y vigilancia de estos dos servicios. Vale la pena señalar que también ha habido de tiempo atrás leyes relacionadas con la protección de cuencas e impulso a la reforestación, así como con la compensación a las comunidades afectadas por las obras de los proyectos que se vienen comentando.

COMENTARIOS FINALES

Los aspectos comentados en los párrafos precedentes han servido para que se avancen y se perfeccionen las actividades científicas y técnicas en las universidades regionales, muy en particular en la Facultad de Minas de la Universidad nacional de Colombia – Sede Medellín, en firmas consultoras como Integral, Consultores Técnicos, Sedic, Ingetec, Mejía Villegas, y Mejía y Millán, entre otras, y en entidades como EPM, ISA e ISAGEN. Debe darse especial crédito a estas tres últimas por el patrocinio de muchos de los trabajos que antes se señalaron, sobre todo en sus etapas iniciales.

No es fácil citar nombres de especialistas de las firmas consultoras antes indicadas pues cualquier lista será incompleta y con un grado de subjetividad. Sin embargo, es conveniente presentar ante las nuevas generaciones figuras emblemáticas que sirvan de ejemplo y referencia. Con respecto a trabajos pioneros relacionados con los proyectos hidroeléctricos se menciona, entre otros, a los ingenieros José Tejada (Integral), Javier Mesa Salazar (Estudios Técnicos), Lucio Chiquito (Sedic), Carlos S. Ospina (Ingetec), Alvaro Villegas Mejía (Mejía Villegas) y José Manuel Mejía y Jaime Millán (Mejía, Millán y Perry).

ACTUALIZACIÓN EN SEPTIEMBRE DE 2014

Una colaboración del profesor Germán Poveda permite actualizar el presente trabajo con la mención a continuación de recientes desarrollos en el programa de posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, en el cual se pueden cursar especializaciones, maestrías y doctorados ofrecidos por la Facultad de Minas de la sede Medellín de la Universidad Nacional de Colombia.

Los proyectos hidroeléctricos han tenido un papel central en las actividades de dicha Facultad relacionadas con los recursos de agua. Al propiciar estos proyectos el encuentro interdisciplinario, los mismos han tenido un efecto jalonador sobre diversas disciplinas de las ciencias naturales y sociales. La consiguiente creación de conocimiento ha dado lugar a nuevos desarrollos transdisciplinarios con aplicaciones en salud humana (malaria, dengue, leishmaniasis), agricultura (café, banano, cítricos), riesgos y desastres naturales (tormentas intensas, inundaciones, deslizamientos, sequías, definición de rondas de inundación, planificación territorial, etc.), oceanografía y procesos costeros, calidad de aguas y del aire, contaminación y remediación, entre otros. Lo anterior ha puesto de presente un proceso dinámico muy significativo.