



Ingeniería y Agrimensura

Dimensión

Revista del Colegio de Ingenieros y Agrimensores de Puerto Rico
Año 37, Vol. 1, 2025 Disponible en el internet: www.ciapr.org

INFRAESTRUCTURA:

Edificios • Carreteras • Puentes • Energética • Renovable

TECNOLOGÍA DE:

Ingeniería de Computadoras • Ingeniería Eléctrica • Ingeniería Ambiental



EXPO CONVENTION 2025

SHAPING PUERTO RICO'S FUTURE

25 | EcoEléctrica

AÑOS

Un mejor ambiente con gas natural



Durante los pasados 25 años, hemos provisto a Puerto Rico energía limpia, segura y confiable, integrando tecnología de avanzada, responsabilidad social y excelencia operacional.

Gracias al compromiso de nuestro equipo de trabajo, EcoEléctrica se ha convertido en un modelo de desarrollo sostenible en el sur de Puerto Rico.

Celebramos 25 años de compromiso con Puerto Rico.



Ingeniería y Agrimensura

Dimensión

Año 37 Vol. 1

Dimensión (Online)
ISSN 2167-7832

Dimensión (Print)
ISSN 2155-1618

CONTENIDO

Conoce a la Junta de Gobierno	4
Mensaje del Presidente del CIAPR.....	5
Mensaje del Presidente de la Junta Editora.....	7
La transición energética en Puerto Rico: hacia una mezcla energética adaptativa y resiliente	9
Ing. Daniel Hernández Morales	
Temas en la ingeniería sismo resistente de estructuras que merecen atención inmediata en Puerto Rico.....	19
Dr. José A. Martínez Cruzado, PhD	
El rol de la agrimensura frente a los desastres naturales	27
Agrimensor Víctor M. Seda Figueroa	
Biotechnology ion exchange chromatography improvement	33
Miguel A. Nieves Ortiz	
Retos y Oportunidades de la Edificación Sostenible utilizando la Inteligencia Artificial	39
Ing. Guillermo Casar Marcos	
Análisis del flujo promedio anual en los ríos principales en Puerto Rico entre 1960-2023	47
Ing. Ferdinand Quiñones Márquez	

Portada por Roberto E. Méndez

Año 37, Vol. 1, 2025

La revista oficial del Colegio de Ingenieros y Agrimensores de Puerto Rico (CIAPR), Dimensión, es publicada por el CIAPR de Puerto Rico. Las opiniones expresadas en el material sometido por los miembros del Colegio son la responsabilidad de sus autores individuales únicamente y las mismas no son necesariamente de Dimensión ni de su Junta Editora. Manuscritos para la revista pueden ser enviados a esta dirección: e-mail dimension@ciapr.org Tel. (787) 758-2250 Fax (787) 274-0918.

CONOCE A LA JUNTA DE GOBIERNO

La Junta de Gobierno del Colegio de Ingenieros y Agrimensores de Puerto Rico (CIAPR) desempeña un rol crucial en la dirección estratégica y operativa de la organización. Este cuerpo directivo está compuesto por líderes colegiados comprometidos con el desarrollo de la ingeniería y la agrimensura en Puerto Rico y en países panamericanos.



JUNTA DE GOBIERNO 2024-2025
COLEGIO DE INGENIEROS Y AGRIMENSORES DE PUERTO RICO



COMITÉ EJECUTIVO

Agrim. Carlos R. Fournier Morales, PS Presidente
Ing. Amarilys Rosario Ortíz, EIT Primer Vicepresidente
Agrim. Juan C. Dávila García, PS Segundo Vicepresidente
Ing. Lilibeth Torres Astacio, PE Secretaria
Ing. Francheska J. Rivera Luciano, PE Tesorera
Ing. Jean C. Rivera Nazario, PE Auditor

PRESIDENTES DE INSTITUTOS

Agrim. Juan A. Rodríguez Vargas, PE IA
Ing. Laura E. Lugo Hernández, PE IIAM
Ing. Francheska J. Rivera Luciano, PE IIC
Ing. Kayri M. Cherena Caraballo, EIT IICOM
Ing. Ángel Díaz Hernández, PE IIE
Ing. Jorge L. Martínez Hernández, PE III
Ing. Anthony Vázquez Vázquez, EIT IIM
Ing. Pedro Quiñones Vélez, PE IIQ

PRESIDENTES DE CAPÍTULOS

Ing. Víctor P. Font Carattini, PE Aguadilla
Ing. Víctor Acosta Sánchez, PE Arecibo
Ing. Jean C. Rivera Nazario, PE Bayamón
Ing. José L. Flores Medina, EIT Caguas
Ing. Juan F. Charles Santana, PE Carolina
Ing. Daniel O. Suárez Cabezudo, PE Exterior
Ing. Lilibeth Torres Astacio, PE Guayama
Agrim. Ángel L. Burgos Carrasquillo, PS Humacao
Ing. Gabriel López de la Rosa, PE Mayagüez
Agrim. Ángel N. Colón Guzmán, PS Ponce
Ing. José L. Pabón Venegas, PE San Juan

ASESORES JUNTA DE GOBIERNO

Ing. Faustino González Quiles, PE Ex Presidente
Ing. Erasto García Pérez, PE Director Ejecutivo
Lcda./Ing. Rhonda Castillo Gammill, ESQ Asesora Legal

2024-2026- Lista de Comisiones Permanentes del CIAPR

COMISIONES - PRESIDENTE DE COMISIÓN

Actividades Especiales - Ing. Juan C. Crespo Pérez, PE
Becas - Ing. Lydia E. Collazo de Jesús, PE
Comunicaciones y Redes Sociales
- Ing. Wilhelm W. Denizard Ramsamy, PE
Defensa de la Profesión - Ing. Alejandro Pinto Flores, PE

DESARROLLO Y PARTICIPACION DE COLEGIADOS

Inversiones - Ing. Héctor Dávila Lozada, PE
Junta de Subastas - Ing. Vidal Mass Salas, PE
Legislación - Ing. José R. Torres Morales, PE
Manejo de Riesgos, Emergencias y Desastres
- Ing. Hanna K. Rodríguez Morales, PE
Reglamentos del Colegio - Ing. Anthony Y. Yrimia Herrera, PE
Recaudación de Estampillas - Ing. Enrique Ruíz Miranda, PE
Servicio al Colegiado Tribunal Disciplinario y Ética Profesional
- Ing. Louis M. Lozada Sorcia, PE
Fundación CIAPR - Agrim. Abiud Reyes Rivera, PS
Educación - Ing. María V. Arroyo Caraballo, PE
Manual y Práctica Profesional y Normas de Competencias
- Ing. Alejandro Pinto Flores, PE
Comisión de Nominaciones y Escrutinio
- Ing. Víctor L. Rivera Collazo, PE
Vinculación Universitaria - Ing. Esther M. Zambrana Cruz, PE

ESPECIALES

Certamen de Décimas y Encendido Navideño
- Ing. Daimarik Torres Cruz, EIT
Energía - Ing. Ralph A. Kreil Rivera, PE
Junta Editora Revista Dimensión
- Dr./Ing. Benjamín Colucci Ríos, PE
Plan Estratégico - Ing. Antonio Medina Delgado, PE
Recreación y Deportes - Ing. Edgar I. Rodríguez Pérez, PE
Terremotos - Ing. José M. Izquierdo Izquierdo, PE

ADHOC

Códigos de Construcción - Ing. Doel F. Muñoz Rivera, PE
Comisión Sistema de Permisos - Ing. Manuel Bermúdez, PE

REGLAMENTO

Junta Administrativa Égida CIAPR
- Ing. Carlos Rodríguez Hernández, PE
Comité de Auditoría Fiscal y Operacional (CAFO)
- Ing. José M. Rodríguez Maldonado, PE
Comisión Conjunta JEIAPR sobre Pasantía de
Examen de Reválida de Ingeniería
- Ing. Antonio Medina Delgado, PE



MENSAJE DEL PRESIDENTE

¡Saludos y felicidades a nuestra gran familia de Ingenieros y Agrimensores de Puerto Rico, en la celebración del octogésimo séptimo aniversario de fundación y la Expo Convención 2025, con el lema “*Shaping Puerto Rico’s Future*”! ¡*Seguimos avanzando juntos, fortaleciendo y expandiendo los servicios a nuestros colegas y a Puerto Rico!*

En esta ocasión, y como parte de nuestro compromiso de excelencia alineado con el Plan Estratégico del CIAPR 2021- 2025, hemos conformado un equipo de excelentes profesionales de la ingeniería, agrimensura y académicos, que aceptaron el llamado de ser miembros de la Junta Editora de la Revista Dimensión. Agradecemos al Presidente de esta Comisión Especial y a su equipo de trabajo en la encomienda de identificar, evaluar y publicar trabajos de temas de interés y apremiantes a nuestras profesiones, suscritos por expertos colegas puertorriqueños y panamericanos.

La variedad de trabajos de investigación y desarrollo con un enfoque práctico, cubiertos en esta edición especial de la Revista Dimensión incluye: *un enfoque práctico hacia una transición energética, adaptativa y resiliente; aspectos medulares en la ingeniería sísmo resistente de estructuras que merecen atención inmediata; el rol de la agrimensura frente a los desastres naturales; mejora de la cromatografía de intercambio iónico en biotecnología; retos y oportunidades de la edificación sostenible utilizando la Inteligencia Artificial, y análisis del flujo promedio anual en los ríos principales en Puerto Rico entre el 1960 y el 2023.*

Eternamente agradecido a los presidentes de Institutos, Capítulos y al Director Ejecutivo que colaboraron mano a mano con el Presidente de la Comisión Editora en la identificación de colegas Ingenieros y Agrimensores para contribuir trabajos de temas pertinentes a su profesión, a los profesionales de Puerto Rico y a nivel panamericano que colaboraron con su experiencia y peritaje en suscribir sus trabajos de investigación y de la práctica de la profesión, y a los auspiciadores por decir presente en esta edición especial de la Revista Dimensión.

Continuaremos sirviendo a nuestro Colegio con una visión renovada en la misión y privilegio colectivo e inigualable de construir el presente y anticipar la infraestructura futura adaptativa, resiliente, sostenible y segura, en beneficio de todos.

Con respeto, orgullo y compromiso firme,

Agrim. Carlos R. Fournier, Presidente del CIAPR





COLEGIO DE INGENIEROS Y AGRIMENSORES
PO BOX 363845 – SAN JUAN, PUERTO RICO 00936-3845
TEL: (787) 758-2250 EXT. 201 presidente@ciapr.org

OFICINA DEL PRESIDENTE

AGRADECIMIENTOS

MIEMBROS DE LA JUNTA EDITORA

REVISTA DIMENSIÓN DEL CIAPR, 2025-2026

Por su esfuerzo y dedicación por su trabajo voluntario como evaluadores de trabajos técnicos incorporados en la Revista Dimensión del CIAPR Año 37, Vol. 1, 2025
“Shaping Puerto Rico’s future”:

Un especial agradecimiento a los miembros de la Junta Editora de la Revista Dimensión del Colegio de Ingenieros y Agrimensores de Puerto Rico (CIAPR), por su trabajo titánico de edición de trabajos técnicos incluidos en la Edición Especial de agosto 2025, como parte de los logros de la celebración del octogésimo séptimo (87mo) aniversario de la fundación de nuestro Colegio, la EXPO CONVENCION 2025 y el trigésimo séptimo (37mo) aniversario de la primera impresión de la Revista Dimensión.

Dra./Ing./Agrim. Evi De la Rosa Ricciardi
Licencia CIAPR 17358-PS; CIAPR 29230-EIT

Agrim. José L. Flores Malavé, PS
Licencia 15428-PS

Dr./Ing. Ricardo R. López-Rodríguez, PE
Licencia CIAPR 10253-PE

Ing. José C. Nieves Vélez, PE
Licencia CIAPR 12683-PE

Ing. José F. Ortiz Vázquez, PE
Licencia CIAPR 9707-PE

Ing. Ángel R. Rivera de la Cruz, PE, JD
Licencia CIAPR 24083-PE

Ing. Francisco Rodríguez Dosal, PE
Licencia CIAPR 15417-PE

Ing. Luis A. Torres Fernández, PE
Licencia CIAPR 10228-PE

Dr./Ing. Benjamín Colucci, PhD, JD, PE, Dist. M. ASCE
Licencia 9482-PE
Presidente, Junta Editora

Agradecemos a Ron Chevako, Presidente, compañía PRI, que llevó a cabo el montaje y edición final de los trabajos y a Roberto E. Méndez que elaboró el arte gráfico de la portada de esta Edición Especial.

MENSAJE DEL PRESIDENTE DE LA JUNTA EDITORA

Un cordial saludo y muchas felicidades a los ingenieros y agrimensores de Puerto Rico, en la celebración de su octogésimo séptimo, 87º, aniversario de su fundación. Los trabajos seleccionados para esta edición especial de la Revista Dimensión cubren áreas de vital interés a nuestra matrícula de ingenieros y agrimensores y están alineados con el lema de nuestra Expo Convención 2025, “*Shaping Puerto Rico’s Future*”.

Agradecemos la confianza empeñada por el Agrim. Carlos R. Fournier, Presidente del Colegio de Ingenieros y Agrimensores de Puerto Rico (CIAPR) por permitirme conformar un equipo de profesionales de primer orden en la evaluación y selección de los artículos publicados.

Un especial agradecimiento a los presidentes de Institutos y Capítulos por identificar posibles autores de temas pertinentes a su profesión, a los profesionales ingenieros y agrimensores de Puerto Rico y a nivel panamericano que colaboraron con su experiencia y peritaje en suscribir sus trabajos de investigación y de la práctica de la profesión, y a los auspiciadores por decir presente en esta edición especial.



1. “La transición energética en Puerto Rico: Hacia una mezcla energética adaptiva y resiliente,” por el ingeniero Daniel Hernández Morales;
2. Temas en la ingeniería sísmo resistente de estructuras que merecen atención inmediata en Puerto Rico,” por el Dr. José A. Martínez Cruzado;
3. “El rol de la agrimensura frente a los desastres naturales,” por el agrimensor Víctor M. Seda Figueroa;
4. “Biotechnology Ion Exchange Chromatography Improvement,” por Miguel A. Nieves Ortiz;
5. “Retos y oportunidades de la edificación sostenible utilizando la Inteligencia Artificial,” por el Ing. Guillermo Casar Marcos; y
6. “Análisis del flujo promedio anual en los ríos principales en Puerto Rico entre 1960-2023,” por el ingeniero Ferdinand Quiñones Márquez.

Espero que los trabajos de esta edición les sean de beneficio en esta coyuntura histórica de sus carreras profesionales rumbo a la reconfiguración de la infraestructura civil de nuestro querido Puerto Rico.

Agradecemos a los miembros de la Junta Editora que con su voluntariado colaboraron con la rigurosidad y excelencia que les caracteriza en la revisión de los trabajos técnicos de esta edición especial.

Con mi mayor aprecio y admiración a la matrícula de ingenieros y profesionales que sirven a nuestra sociedad civil para el beneficio de presente y futuras generaciones.

Benjamín Colucci, PhD, JD, PE, PTOE, FITE, APRI, API, Dist. M. ASCE
Presidente, Comisión Editora, Revista Dimensión, 2025-2026

TODOS LOS SERVICIOS, UN SOLO ALIADO

Desde el diseño hasta el mantenimiento preventivo, en Outpower Energy lo hacemos todo.

Nuestra cobertura incluye proyectos industriales, comerciales y residenciales en toda la isla.



Diseño Eléctrico

Ingeniería especializada en sistemas de generación desde 10kW a 2,000kW.



Entrega Segura

Logística especializada para equipos industriales a toda la isla.



Instalación Certificada

Conexiones, ATS y Start Up por personal licenciado.



Soluciones Industriales

Proyectos para comercio, industria y gobierno.



Generación Residencial

Instalación completa y profesional con opciones personalizadas.



Servicio Postventa

Mantenimiento, piezas, despacho de diésel y garantía por técnicos certificados.



HD INDUSTRIAL
100kW a 2,000kW

Únicos Distribuidores Autorizados de la Marca Hipower en Puerto Rico.



Contáctanos:
Tel. 787-708-6048
www.outpowerenergy.com

OUTPOWER
LIGHT YOUR LIFE

LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN PUERTO RICO: HACIA UNA MEZCLA ENERGÉTICA ADAPTATIVA Y RESILIENTE

ING. DANIEL HERNÁNDEZ MORALES

ABSTRACTO

La transición energética de Puerto Rico hacia un sistema 100 % renovable enfrenta retos operativos complejos. La creciente penetración de fuentes renovables variables, combinada con una flota térmica envejecida y una infraestructura de transmisión y distribución tradicional, compromete la estabilidad del sistema eléctrico. Sin una estrategia integral, la integración masiva de energías renovables podría aumentar los riesgos de estabilidad, incrementando la posibilidad de interrupciones del servicio y apagones.

Este artículo propone un enfoque basado en una mezcla energética adaptativa, capaz de integrar renovables de forma segura y resiliente. A través de un análisis técnico-operacional del sistema eléctrico de Puerto Rico, se identifican diez principios operativos esenciales y se evalúan soluciones complementarias, como sistemas de almacenamiento, ciclos combinados flexibles, turbinas de respuesta rápida y modernización de la red.

El impacto esperado es doble: primero, habilitar una transición energética que preserve la confiabilidad y seguridad operativa del sistema; segundo, establecer una arquitectura técnica que permita integrar de forma sostenible altos niveles de energía renovable, garantizando un suministro resiliente ante eventos climáticos extremos y demandas futuras. La estabilidad no puede ser un efecto secundario de la transición: debe ser su condición fundamental.

En Puerto Rico, el debate sobre la transición hacia un sistema eléctrico basado en **energías 100% renovables** ha cobrado nuevo impulso. Si bien el marco legal ya establece este objetivo, persisten retos técnicos y operativos que deben ser atendidos para lograr una transformación exitosa. Uno de los aspectos más críticos —y a menudo marginado en las discusiones públicas— es la **estabilidad operativa del sistema eléctrico**, un pilar indispensable para garantizar un suministro confiable y continuo.

Este artículo busca presentar, desde una perspectiva operacional, las consideraciones esenciales para **evolucionar hacia una mezcla energética adaptativa**: un modelo capaz de integrar renovables de forma segura, resiliente y flexible, adaptado a las necesidades y características del sistema eléctrico de Puerto Rico. **La pregunta clave es: ¿cómo aumentar la participación de las energías renovables garantizando la fiabilidad y seguridad operativa de la red?** La respuesta, aunque compleja, reside en una estrategia que combine de manera adecuada **generación renovable, recursos flexibles de energía, servicios ancilares** y una **infraestructura de transmisión y distribución (T&D)** moderna y robusta.

FUNDAMENTOS OPERATIVOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO

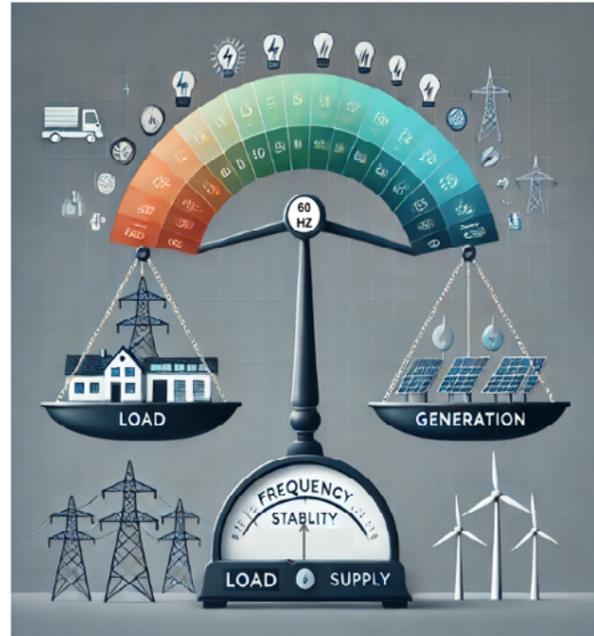


Figura 1. Diagrama de balance entre generación y demanda eléctrica.

Para entender los retos operacionales en Puerto Rico, es necesario comenzar por los principios básicos que sustentan la confiabilidad de cualquier sistema eléctrico. Todo sistema eléctrico funcional depende del equilibrio instantáneo entre la demanda y la generación. Para mantener la frecuencia del sistema constante en 60 Hz —el valor estándar en Puerto Rico—, la generación debe ajustarse casi de forma inmediata ante cualquier variación en la carga.

La figura 1 representa este principio fundamental, mostrando cómo la generación debe responder dinámicamente a los cambios en la demanda para sostener la estabilidad de la frecuencia del sistema.

Para lograr este balance, la generación debe responder en tiempo real a las variaciones tanto de carga como de generación. Estas variaciones pueden deberse a cambios en la producción de fuentes renovables variables o a la salida repentina de unidades generatrices. Esta capacidad de respuesta requiere de una combinación de atributos técnicos que no todos los generadores poseen. Entre los más importantes se encuentran:

- **Regulación de frecuencia:** permite mantener la frecuencia del sistema dentro de márgenes seguros ante aumentos o reducciones súbitas de carga.

- **Control de voltaje:** esencial para evitar fluctuaciones que puedan dañar equipos o afectar la calidad del servicio.
- **Reserva giratoria:** capacidad adicional que está sincronizada y lista para entrar en operación inmediata ante una contingencia.
- **Inercia:** masa rotacional de los generadores que ayuda a resistir cambios abruptos en la frecuencia del sistema.

- **Capacidad de cortocircuito:** necesaria para la correcta operación de los esquemas de protección y la detección de fallas.

Más allá de los atributos individuales que aporta la generación firme, todo sistema eléctrico confiable —sin importar su combinación tecnológica— debe cumplir con un conjunto de principios operativos fundamentales. Estos principios aseguran que el sistema sea capaz de integrar renovables de forma segura, sostener la estabilidad en tiempo real y recuperarse ante contingencias. La Figura 2 resume estos 10 principios operativos esenciales que todo sistema eléctrico confiable debe cumplir para operar de manera segura y estable bajo una mezcla energética adaptativa.

Los 10 principios operativos que todo sistema confiable debe cumplir:

1 Balance instantáneo generación-demanda - En todo momento, la generación debe igualar la demanda para mantener la frecuencia estable.

2 Estabilidad de frecuencia - El sistema debe resistir desviaciones abruptas de frecuencia ante perturbaciones.

3 Estabilidad de voltaje -El voltaje debe mantenerse dentro de rangos seguros en toda la red.

4 Inercia suficiente - El sistema debe contar con suficiente inercia (física o sintética) para amortiguar variaciones rápidas de frecuencia.

5 Capacidad de integración segura de generación distribuida- El sistema debe ser capaz de integrar generación renovable distribuida de manera segura, gestionando flujos bidireccionales y garantizando la estabilidad y protección de la red.

6 Capacidad de operación en mini islas eléctricas - El sistema debe ser capaz de operar en modo isla a nivel regional o local, manteniendo cargas críticas durante eventos extremos o interrupciones en la red principal.

7 Reserva operativa adecuada -El sistema debe contar con reservas suficientes (giratorias y no giratorias) para responder a contingencias.

8 Capacidad de cortocircuito y soporte a protecciones- Debe garantizarse una capacidad mínima de cortocircuito para el correcto funcionamiento de los esquemas de protección.

9 Flexibilidad operativa - El sistema debe ser capaz de adaptarse a variaciones de generación renovable y demanda con rapidez y estabilidad

10 Resiliencia -El sistema debe contar con la capacidad de recuperarse de apagones totales (black start), restableciendo la operación de la red de manera segura, ordenada y en tiempos aceptables, sin depender de recursos externos.

Figura 2 - 10 Principios básicos de todo sistema eléctrico

EL RETO DE LA VARIABILIDAD RENOVABLE

Las fuentes renovables variables, como la solar y la eólica, presentan características de intermitencia y dependencia climática que las hacen inherentemente variables e impredecibles. Su integración masiva en la red implica nuevos desafíos para mantener la estabilidad del sistema, especialmente cuando las condiciones meteorológicas reducen súbitamente su producción o durante periodos en los que no hay recurso disponible, como ocurre en el caso de la energía solar durante la noche. Por tanto, la integración de energías renovables debe ir acompañada de recursos de respaldo firmes para asegurar la estabilidad del sistema.

En Puerto Rico, aunque ya se han instalado aproximadamente 1,200 MW de capacidad renovable, estos recursos solo aportan generación efectiva durante un promedio de 4 a 5 horas al día. Durante las horas de mayor producción solar, el sistema experimenta una reducción significativa en la demanda aparente. Esto ocurre porque, en ese periodo, la mayoría de los más de 150,000 clientes con sistemas solares en techos generan el 100% de la energía que consumen, exportando el excedente a la red bajo el programa de medición neta. Posteriormente, entre las 4:00 p.m. y las 9:00 p.m., se observa un aumento pronunciado en la demanda que debe ser cubierta por generación convencional, coincidiendo con la disminución drástica de la producción renovable. Este comportamiento, conocido como **la curva del pato**, representa un riesgo operativo considerable, especialmente en un sistema que depende de plantas envejecidas y con capacidad limitada de respuesta.

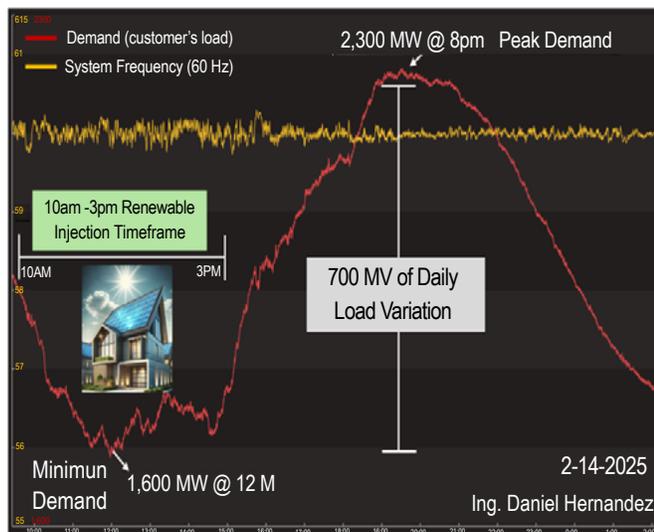


Figura 3. Curva del pato en Puerto Rico (ejemplo típico).

La figura 3 ilustra este patrón diario, mostrando cómo la incorporación de generación renovable en techos residenciales reduce la carga total del sistema (línea roja) durante las horas de mayor producción solar, seguida por un aumento pronunciado en la tarde, justo cuando la energía solar deja de estar disponible. Esta variabilidad diaria impone una presión considerable sobre generadores que datan de la década de

1960, los cuales no fueron diseñados para operar con rampas tan abruptas y frecuentes. Como consecuencia, se acelera el desgaste y la fatiga de componentes críticos — como tuberías de calderas, turbinas y sistemas auxiliares— aumentando la frecuencia de fallas y provocando interrupciones en el servicio para los clientes.

Adicionalmente, durante el pico solar, muchas de estas unidades térmicas deben reducir su producción por debajo de los niveles mínimos requeridos para ofrecer servicios de regulación de frecuencia. Al operar fuera de su rango óptimo, pierden capacidad de respuesta automática ante desviaciones, lo que obliga a gestionar manualmente el control de frecuencia. Esto retrasa la respuesta del sistema frente a perturbaciones y aumenta el riesgo de inestabilidad justo en las horas más críticas del día.

ESTADO DE LAS FUENTES DE RESPALDO EN PUERTO RICO

La situación de los recursos de respaldo en Puerto Rico es motivo de seria preocupación. Aproximadamente el 70% de la generación convencional proviene de plantas termoeléctricas construidas entre las décadas de 1950 y 1970, como se muestra en la figura 4. Estas unidades, diseñadas para operar bajo condiciones estables y predecibles, carecen de la flexibilidad necesaria para responder con rapidez a las variaciones de carga que caracterizan a un sistema con alta penetración de fuentes renovables.



Figura 4 Ejemplo de plantas térmicas en operación

A nivel internacional, los sistemas eléctricos con un alto componente renovable mantienen una capacidad firme de respaldo equivalente al 30-50% de la capacidad renovable instalada. Puerto Rico carece actualmente de un análisis técnico riguroso que establezca esta proporción óptima en función de su demanda, topografía, características de red y proyecciones de crecimiento renovable. Esta brecha técnica debe ser corregida con urgencia para evitar riesgos operativos en el proceso de transición.

De aquí surge la necesidad urgente de transicionar de la actual flota térmica, compuesta por unidades antiguas

y poco flexibles, hacia una mezcla energética moderna y adaptativa que permita integrar renovables de forma segura, sin comprometer la estabilidad y resiliencia del sistema. Esta transición debe considerar tecnologías que, además de ser limpias, puedan participar activamente en el control del sistema eléctrico, reforzando su estabilidad, resiliencia y capacidad de adaptación.

EL ROL ESTRATÉGICO DE LAS FUENTES DE RESPALDO

Más que añadir respaldo en forma aislada, el reto es evolucionar hacia una mezcla energética flexible y balanceada, que complemente la variabilidad renovable y asegure la estabilidad del sistema en todo momento.

La integración masiva de fuentes renovables en el sistema eléctrico plantea importantes desafíos derivados de su naturaleza intermitente y variable. Para garantizar la estabilidad operativa del sistema y evitar interrupciones en el suministro, es fundamental contar con recursos de respaldo que puedan activarse de manera rápida y operar eficientemente bajo condiciones dinámicas y cambiantes.

Estos recursos de respaldo deben proporcionar flexibilidad, capacidad de respuesta inmediata y servicios ancilares esenciales, tales como regulación de frecuencia, capacidad de corto circuito, control de voltaje y reserva giratoria. A continuación, se describen las tecnologías más prometedoras y sus contribuciones clave al sistema eléctrico:

- **Sistemas de almacenamiento en baterías (BESS):** Los sistemas de almacenamiento con baterías han emergido como una solución tecnológica crucial para suavizar las rampas de carga y descarga que se presentan debido a la variabilidad renovable. Estos sistemas pueden suministrar energía en cuestión de segundos, ofreciendo soporte inmediato en momentos de alta demanda o baja generación renovable. Además, los BESS proporcionan servicios auxiliares vitales, incluyendo regulación de frecuencia y apoyo al control de voltaje, lo que contribuye a la estabilidad dinámica del sistema. Su rápida respuesta y modularidad los hacen ideales para integrar grandes cantidades de energía renovable.
- **Ciclos combinados como fuente de generación base flexible:** Los ciclos combinados de alta eficiencia representan una opción ideal como **generación base flexible** en sistemas eléctricos con alta penetración de energía renovable. Estas unidades ofrecen alta eficiencia térmica y bajas emisiones cuando operan en carga base, pero también cuentan con la capacidad de modular su producción en respuesta a la variabilidad de la generación renovable. A diferencia de las unidades térmicas convencionales más antiguas, los ciclos combinados modernos pueden participar activamente en el seguimiento

de carga, proveer regulación de frecuencia y operar de manera eficiente en rangos parciales de carga. Su capacidad para mantener estabilidad operativa mientras permiten la integración creciente de renovables los convierte en un componente esencial para la transición hacia una matriz energética confiable y con alta penetración renovable.

- **Turbinas de gas de arranque rápido:** Las turbinas de gas con capacidad de arranque rápido representan una opción eficiente para responder ágilmente a cambios súbitos en la demanda o a la pérdida inesperada de generación renovable. Estas unidades pueden entrar en operación en minutos, ajustando su producción con rapidez para mantener el balance carga-generación. Su flexibilidad operativa y eficiencia en el rango medio de carga las posicionan como un componente esencial para complementar la generación renovable variable, especialmente en sistemas con alta penetración de recursos intermitentes.
- **Almacenamiento hidroeléctrico por bombeo:** Aunque la geografía y topografía de Puerto Rico limitan la implementación masiva de esta tecnología, el almacenamiento hidroeléctrico por bombeo sigue siendo una opción valiosa en zonas específicas. Este método consiste en almacenar energía mediante el bombeo de agua a un embalse elevado durante períodos de baja demanda, para luego liberarla a través de turbinas en momentos de alta demanda. Este sistema es capaz de proporcionar grandes cantidades de energía firme con tiempos de respuesta adecuados para estabilizar la red, además de contribuir a la regulación de frecuencia y reserva giratoria.

Además de contribuir a la estabilidad operativa, estas tecnologías fortalecen la resiliencia del sistema eléctrico ante eventos extremos, como huracanes, tormentas tropicales o fallas técnicas. La capacidad de aislar y mantener el suministro durante emergencias es crítica para minimizar el impacto social y económico de estas interrupciones. La incorporación de fuentes de respaldo modernas y flexibles es, por tanto, un elemento estratégico para asegurar un sistema eléctrico confiable, eficiente y adaptable al futuro energético de Puerto Rico.

INFRAESTRUCTURA DE TRANSMISIÓN Y DISTRIBUCIÓN: EL TALÓN DE AQUILES

La infraestructura de transmisión y distribución (T&D) es un componente esencial para la operación eficiente y confiable de cualquier sistema eléctrico. Sin embargo, en Puerto Rico, esta infraestructura fue concebida y diseñada originalmente para un modelo de flujo unidireccional de energía, en el que la electricidad se generaba principalmente en grandes centrales y se distribuía hacia los consumidores

finales. Este diseño tradicional enfrenta limitaciones significativas frente a los cambios actuales en el perfil de generación y consumo energético.

Con la creciente penetración de generación distribuida, especialmente a través de sistemas solares residenciales y otras fuentes renovables distribuidas, el sistema eléctrico debe adaptarse para permitir flujos bidireccionales de energía. Esto significa que la electricidad ya no solo fluye desde las centrales hacia los consumidores, sino también en sentido contrario, cuando los usuarios generan y exportan energía a la red. Sin una modernización adecuada, estos flujos variables pueden causar problemas de estabilidad, calidad del servicio y protección de la red.

Entre las mejoras imprescindibles para preparar la infraestructura de T&D a esta nueva realidad se destacan:

- Actualización de esquemas de protección eléctrica:**

Los esquemas de protección tradicionales están diseñados para condiciones de flujo unidireccional y pueden no detectar adecuadamente las fallas en un sistema con flujos variables y bidireccionales. Es necesario implementar sistemas de protección avanzados que se adapten a estas condiciones, garantizando la rápida detección y aislamiento de fallas sin comprometer la operación general del sistema. **Instalación de bancos de condensadores automáticos:**

El control dinámico de voltaje es fundamental para mantener la calidad del suministro, especialmente en redes con alta penetración de generación distribuida. Los bancos de condensadores automáticos permiten compensar de forma activa

y continua las variaciones de voltaje, evitando fluctuaciones que podrían afectar a equipos sensibles o generar pérdidas técnicas.

- Implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real y redes inteligentes (smart grids):**

La incorporación de tecnologías de medición avanzada, sistemas de control automatizado y comunicaciones en tiempo real es vital para una operación más flexible y segura. Las redes inteligentes facilitan la integración eficiente de recursos distribuidos, mejoran la capacidad de respuesta ante contingencias y optimizan la gestión de la demanda y generación.

La ausencia o insuficiencia de estas inversiones tecnológicas limita severamente la capacidad del sistema para integrar nuevas fuentes renovables de manera eficiente y segura. Además, aumenta la vulnerabilidad del sistema frente a eventos inesperados, afectando la confiabilidad y resiliencia de la red eléctrica. Por ello, la modernización de la infraestructura de T&D es un elemento estratégico indispensable para acompañar la transición energética y asegurar un suministro estable y de calidad para Puerto Rico.

MEZCLA ENERGÉTICA ADAPTATIVA: MODELO CLAVE A SEGUIR PARA UNA TRANSICIÓN ENERGÉTICA EXITOSA

Frente a estos retos operacionales, **proponemos** un enfoque fundamentado en una **mezcla energética adaptativa**. La **figura 5** presenta un esquema conceptual de los elementos esenciales que conforman esta estrategia, cuyo objetivo es integrar de manera eficiente las energías renovables sin comprometer la estabilidad del sistema eléctrico.



Figura 5. Componentes clave de una mezcla energética adaptativa

El modelo se apoya en tres pilares principales:

1. **Energía limpia**, que incluye fuentes renovables a gran escala, generación eólica y sistemas solares distribuidos en techos residenciales.
2. **Modernización de la infraestructura de transmisión y distribución (T&D)**, mediante la implementación de sistemas de gestión energética (EMS), redes inteligentes, mecanismos avanzados de protección eléctrica y control dinámico de voltaje.
3. **Recursos flexibles**, indispensables para la estabilidad operativa, como plantas pico (Peaker), sistemas de almacenamiento con baterías (BESS), ciclos combinados (CC) y plantas virtuales de energía (VPP).

En conjunto, estos componentes configuran una arquitectura energética **resiliente, escalable y adaptable** a las condiciones cambiantes de la red eléctrica.

Este modelo promueve una combinación equilibrada y dinámica entre energías renovables, tecnologías de respaldo y modernización de infraestructura. Su fortaleza radica en una planificación flexible, guiada por datos operativos, simulaciones de carga y análisis en tiempo real del comportamiento del sistema.

A diferencia de un enfoque rígido basado únicamente en metas estáticas de capacidad instalada, esta estrategia permite ajustar progresivamente la estructura energética según las necesidades técnicas del sistema, favoreciendo su **estabilidad, eficiencia y resiliencia a largo plazo**.

RECOMENDACIONES PARA LA POLÍTICA PÚBLICA ENERGÉTICA

Para viabilizar una transición energética ordenada, sostenible y técnicamente viable, es imprescindible llevar a cabo una revisión profunda de la Ley de Política Pública Energética de Puerto Rico. Esta revisión debe incorporar principios técnicos sólidos que respalden el desarrollo de un sistema eléctrico moderno, seguro y adaptable a los desafíos actuales y futuros.

Se recomiendan las siguientes acciones clave:

1. **Establecer mecanismos de evaluación periódica y dinámica del sistema eléctrico**, que permitan determinar y ajustar la proporción óptima entre recursos renovables y capacidades de respaldo flexible. Esto debe basarse en análisis técnicos rigurosos y datos operativos reales, asegurando un equilibrio que garantice la estabilidad y confiabilidad del sistema.
2. **Reestructurar la planificación y desarrollo de la infraestructura de transmisión y distribución (T&D)** para facilitar la integración eficiente de generación distribuida y recursos renovables. Esto

incluye promover estándares técnicos actualizados, fomentar inversiones en modernización y asegurar que la red pueda operar con flujos bidireccionales sin comprometer la calidad y seguridad del suministro.

3. **Diseñar y establecer incentivos regulatorios claros y efectivos**, orientados a fomentar la inversión en tecnologías clave como almacenamiento de energía, sistemas de respuesta a la demanda y otras soluciones de flexibilidad operativa. Estos incentivos deben promover la participación activa de todos los actores del sector, incentivando innovaciones que contribuyan a la resiliencia y sostenibilidad del sistema eléctrico.

Estas recomendaciones buscan crear un marco normativo robusto que facilite la adaptación técnica y operativa del sistema eléctrico, asegurando que la transición hacia energías renovables se realice con una base sólida, eficiente y segura para todos los usuarios.

CONCLUSIÓN

La transición energética no debe enfocarse únicamente en la expansión de la capacidad renovable, sino en su integración segura y sostenible dentro de un sistema eléctrico complejo y exigente. Adoptar una mezcla energética adaptativa —que equilibre generación renovable, recursos de respaldo y modernización de la red— es fundamental para construir un sistema eléctrico confiable, resiliente y preparado para los desafíos operativos y estratégicos del futuro.

La transformación energética de Puerto Rico hacia una matriz 100% renovable no se logrará únicamente instalando megavatios de energía limpia. La verdadera transición consiste en rediseñar la operación del sistema eléctrico para que sea estable, resiliente y técnicamente robusto, aun cuando el recurso renovable sea intermitente y descentralizado.

Esto requiere reconocer que la energía renovable, por sí sola, no aporta los atributos eléctricos que sostienen el sistema en tiempo real: frecuencia, voltaje, reserva, inercia y capacidad de recuperación tras eventos extremos. Estos atributos —tradicionalmente provistos por plantas térmicas— deben ser cuidadosamente planificados, medidos, regulados y remunerados mediante una arquitectura de servicios ancilares moderna y funcional. En el caso de Puerto Rico, un sistema insular vulnerable a desastres naturales, esta necesidad es aún más crítica.

Por ello, el marco de política energética y de planificación operativa del país debe evolucionar hacia un enfoque que:

- Integre explícitamente los servicios ancilares como criterios técnicos obligatorios.
- Establezca mecanismos de evaluación y monitoreo continuo de estos servicios.

- Desarrolle marcos normativos y de mercado que incentiven su provisión, ya sea desde recursos centralizados o distribuidos.
- Priorice la inversión en tecnologías que ofrezcan respaldo, control y recuperación efectiva ante emergencias.
- Solo mediante un enfoque técnico, adaptativo y apoyado por políticas públicas bien estructuradas, Puerto Rico podrá avanzar con firmeza hacia un futuro energético renovable sin poner en riesgo la estabilidad y resiliencia que son la base de un sistema eléctrico moderno y sostenible.

📌 Cita clave

“No puede haber una red renovable si no hay una red estable. Y no puede haber una red estable sin servicios auxiliares.”

— Daniel Hernández Morales, PE, MEM

REFERENCIAS

Ilustración 1: Concepto gráfico de balance generación-demanda.. Elaboración propia asistida por inteligencia artificial generativa para visualización técnica.

Figura 2: Los 10 principios operativos esenciales de un sistema eléctrico confiable.

Esta figura es una síntesis técnica elaborada por el autor, basada en principios recogidos en las siguientes fuentes:

- IEA (2011), *Smart Grids Technology Roadmap*
- DOE (2020), *Grid Modernization Multi-Year Program Plan*
- CIGRÉ TB 727 (2018), *Benchmarking of Control Schemes for Voltage Stability*
- NERC (2022), *Reliability Guidelines for Inverter-Based Resources*
- EPRI (2021), *Grid Flexibility and Resilience Framework*

Gráfica 3: Variabilidad diaria de la carga neta en Puerto Rico (Curva del Pato).

Datos obtenidos de PI System de la Autoridad de Energía Eléctrica de Puerto Rico (PREPA), análisis propio.

Figura 4: Edad de la flota térmica de Puerto Rico. Fuente: Análisis propio basado en el inventario de unidades de generación de la Autoridad de Energía Eléctrica (PREPA) y documentación pública, incluyendo:

Integrated Resource Plan (IRP) de PREPA, aprobado por el Negociado de Energía de Puerto Rico, 2020

Figura 5: Esquema conceptual de la mezcla energética adaptativa.

Elaboración propia para este artículo, con base en modelos de planificación de sistemas resilientes y experiencias internacionales.

Datos sobre penetración de sistemas solares residenciales (~150,000 clientes)

Fuente: LUMA Energy. Customer Participation in Net Energy Metering (NEM) Program – Quarterly Report, primer trimestre de 2025. Documento público presentado ante el Negociado de Energía de Puerto Rico. Disponible en: <https://energia.pr.gov/casos/>

Datos sobre capacidad renovable instalada (~1,200 MW)

Fuente: LUMA Energy. Customer Participation in Net Energy Metering (NEM) Program – Quarterly Report, primer trimestre de 2025. Documento público presentado ante el Negociado de Energía de Puerto Rico. Disponible en: <https://energia.pr.gov/casos/>

Referencias conceptuales sobre servicios auxiliares.

Basado en la experiencia profesional del autor y en análisis técnicos publicados por organismos especializados, incluyendo:

- **NERC (North American Electric Reliability Corporation):** *Essential Reliability Services: A Primer*, 2016.
- **U.S. Department of Energy (DOE):** *Maintaining Reliability in the Modern Power System*, 2017, y *Grid Modernization Multi-Year Program Plan*, 2020.

Referencias conceptuales sobre “A nivel internacional, los sistemas eléctricos con un alto componente renovable mantienen una capacidad firme de respaldo equivalente al 30-50% de la capacidad renovable instalada.”

- NREL, *Renewable Electricity Futures Study*, 2015

RESEÑA

El ingeniero Daniel Hernández Morales es un profesional experimentado en el sector energético de Puerto Rico, con más de 35 años de trayectoria en ingeniería eléctrica y liderazgo en generación, transmisión y distribución.

Desde mayo de 2023 hasta mayo de 2025, brindó servicios de consultoría a Genera PR, donde asumió el cargo de Vicepresidente de Operaciones durante una etapa crítica de transición para el sistema eléctrico. En este rol, lideró la conceptualización de proyectos estratégicos clave para estabilizar la flota de generación, entre ellos: El proyecto de 430 MW de almacenamiento de energía con baterías (BESS), diseñado para aumentar la flexibilidad operativa del sistema eléctrico, reducir los apagones en hasta un 90% y facilitar la integración de energía renovable.

El Programa de Reemplazo de Componentes Críticos, enfocado en modernizar la infraestructura de generación y reducir a la mitad las fallas forzadas, garantizando una operación más confiable a largo plazo.

Finalizada esa etapa de colaboración con Genera, Hernández Morales continúa aportando a la transformación energética de Puerto Rico desde un rol independiente como consultor estratégico. Actualmente se dedica a brindar asesoría técnica especializada en interconexión de nuevos recursos energéticos a la red, análisis de sistemas de protección eléctrica, integración de almacenamiento, estudios de estabilidad del sistema y diseño de políticas regulatorias orientadas a una transición energética confiable, sostenible y basada en fundamentos de ingeniería.

Entre 2021 y 2023, se desempeñó como Director de Proyectos Renovables en LUMA Energy, facilitando la interconexión de proyectos renovables a gran escala. Durante sus 32 años en la Autoridad de Energía Eléctrica (PREPA), ocupó posiciones clave como Director de Generación, Jefe de Subestaciones y Gerente de Puesta en Marcha, liderando la integración de proyectos solares y eólicos, así como mejoras en sistemas de protección, mantenimiento y confiabilidad de la red.

Con una visión estratégica y una sólida experiencia técnica, actualmente dirige PRET (Puerto Rico Energy Transformation), una plataforma de análisis y asesoría dedicada a apoyar la

transición energética de la isla mediante estudios, propuestas regulatorias y liderazgo técnico independiente.



Ing. Daniel Hernández Morales



We Design Through Innovation

Traffic and Traffic Signals Management Centers	Design and Build Projects	Intelligent Transportation System Design	Traffic Data Collection
Dynamic Toll Lane Design + Management	Renewable Energy Design and Installation	Construction Inspection	Roadway Design

metricpr.com | 939.545.1510
Join Our Team: jobs@metricpr.com





Fractal Engineering, PSC

Engineering Consulting | Design | Inspection
Disaster Recovery | Construction Management
Program Management

1602 Ave. Ponce de Leon, Suite 406, San Juan, PR, 00909
P.O. Box 10365 San Juan, PR, 00922
info@fractalengineers.com



kleinengineering psc



Our mission: Save lives

through *safer roadway design*
& *efficient traffic operations*

Acknowledged excellence in:

- Highway design
- Multimodal facilities
- Highway safety analysis
- Temporary traffic control
- Signalized corridor analysis
- Intersection studies and design
- Unmanned aircraft systems (UAS)
- Traffic impact studies for site development

787-993-2071

info@klein-engineering.com
careers@klein-engineering.com

San Juan, PR | Fairfax, VA | Orlando, FL
www.klein-engineering.com



SAVE THE DATE

MAY 8
2026





CRB Caribe, LLP
Engineers ▪ Architects

THE RELENTLESS PURSUIT OF SUCCESS. YOURS.™

CRB Caribe, LLP is expanding and seeking **Engineers** (Mechanical, Electrical, Structural, Civil, Chemical, Process, Instrumentation & Controls) and **Architects**. Candidates must have a Puerto Rico license from the Department of State and must be active members of CIAPR or CAAPR and preferably have design experience in pharmaceutical or industrial manufacturing projects.

We offer:

- Competitive salaries with paid overtime for exempt employees
- Business travel reimbursement
- Comprehensive benefits package

CRB Caribe delivers full-service **engineering, architecture, and construction support**, including permitting and inspection services. We foster a **collaborative, respectful, and flexible work environment**, committed to integrity, client success, and professional growth.

To apply, please email your resume and specify your engineering discipline or architecture background to **tom.forester@crbgroup.com** and **shirley.nieves@crbgroup.com**. Salary expectations are optional but welcomed. We are seeking candidates for **long-term employment**.

You may also submit your resume and salary requirements confidentially by mail to:

Thomas Forester
CRB Caribe, LLP2
Suite 314, Mailbox #21
1738 Amarillo Street
San Juan, PR 00926
Or fax to: (787) 622-2725

TEMAS EN LA INGENIERÍA SISMO RESISTENTE DE ESTRUCTURAS QUE MERECE ATENCIÓN INMEDIATA EN PUERTO RICO

DR. JOSÉ A. MARTÍNEZ CRUZADO, PhD

ABSTRACTO

En el presente artículo se pretende presentar, de forma simple y amena, asuntos en la ingeniería sísmo resistente de estructuras que, a juicio del autor, son de gran relevancia para la sociedad puertorriqueña y requieren ser atendidos con urgencia por el riesgo continuo al que se está expuesto. El autor; especializado en el diseño sísmo resistente de estructuras de hormigón armado; habiendo realizado visitas de reconocimiento a múltiples países luego de terremotos de alta intensidad; dirigiendo la Red Sísmica de Movimiento Fuerte donde se han instrumentado sísmicamente represas, edificios, puentes, e instalado y operado más de 115 estaciones a campo libre en cinco países; y con más de 31 años en la academia dirigiendo proyectos de investigación y dictando cursos; identifica situaciones problemáticas con el mapa de peligrosidad sísmica del código actual, con estructuras hospitalarias, escolares, estructuras sobre zancos y represas. Ante estos problemas se realizan recomendaciones específicas, dirigidas al gobierno y primordialmente a la comunidad ingenieril, con la intención de que sirvan de guía para una ejecución apropiada de la solución.

INTRODUCCIÓN

En las décadas más recientes se ha confirmado que la Isla de Puerto Rico está plagada de fallas sísmicas, la inmensa mayoría de ellas no estudiadas o pobremente estudiadas. Sin embargo, la Red Sísmica de Puerto Rico (PRSN) registra miles de sismos anuales, un alto porcentaje de ellos con epicentros en tierra pero sin la precisión suficiente para asignar inequívocamente el mismo a una falla en particular. Por otro lado, el terremoto del 9 de febrero de 1971 en San Fernando, California propició muchísima investigación científica que mejoró significativamente el diseño sísmo resistente de estructuras. Pero estos cambios vinieron a reflejarse en el código de edificación de Puerto Rico en 1987. De modo que miles de estructuras existentes fueron diseñadas bajo códigos que no contemplaban detalles de ductilidad para que las estructuras pudieran disipar energía por medio de la deformación inelástica. Y ni hablar de las miles de estructuras que han sido construidas y siguen siendo construidas de manera informal. En Chile, donde aproximadamente cada 25 años los azota un terremoto de gran magnitud, en principio han resuelto el problema de colapsos y hasta el de daños en estructuras, proveyéndole a las estructuras porcentajes relativamente altos de área seccional

de paredes estructurales en relación al área de la planta. Sin embargo, desgraciadamente, ya sea por aspectos económicos, o peor aún, por aspectos arquitectónicos, parece que el resto del mundo se resiste a adoptar códigos similares a los chilenos.

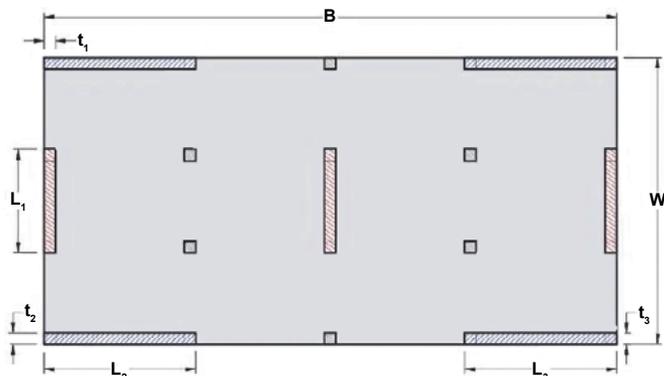
En este breve artículo se presentan los problemas principales de estructuras que, a juicio del autor, deben ser atendidos, en Puerto Rico, con premura pero bien hechos. Y se subraya “bien hechos” porque, a modo de ejemplo, el problema de columnas cortas en estructuras escolares, que hace décadas fue identificado, sigue tan vigente como desde un principio a pesar de varios proyectos que el gobierno ha presentado y ejecutado para solucionar el mismo. Aparte de esta situación, que no se desarrolla en este artículo, se presenta primeramente comentarios generales sobre los códigos de edificación para luego pasar a la mayor deficiencia del código de edificación de Puerto Rico, que es el Mapa de Peligrosidad Sísmica, y los grandes esfuerzos que los científicos están llevando a cabo para mejorarlo. Finalmente se presenta una pequeña variedad de estructuras que deben atenderse presentando la problemática principal y recomendaciones para mitigar los daños que seguramente van a experimentar si no se toma acción a tiempo. Estas estructuras incluyen; estructuras hospitalarias, estructuras escolares, estructuras residenciales en columnas esbeltas, conocidas como “zancos”, y represas. Hay otras estructuras de gran relevancia que deben revisarse pero que no han sido incluidas como lo son los edificios multipisos construidos previo al 1987, las estructuras en las centrales termoeléctricas, las estructuras relativas a acueductos y alcantarillados, y las de los diversos puertos.

CÓDIGOS DE EDIFICACIÓN

Cada ciudadano debe estar consciente que los códigos de edificación son requisitos mínimos, y que esto implica que de seguir estrictamente estos requisitos mínimos la estructura no debe colapsar ante los efectos del terremoto máximo considerado por el código pero quedará en tan mal estado que será necesario demolerla posteriormente, quedándose en la calle el dueño de la estructura. A este desempeño de la estructura se le denomina “prevención de colapso”. Por esta razón es esencial que, antes de comenzar a sugerir planos preliminares con distribuciones de espacio, y distribución de paredes estructurales y columnas, el ingeniero diseñador se reúna con el dueño de la estructura a ser diseñada y el arquitecto, y les explique la filosofía detrás del *Diseño Basado*

en *Desempeño*. Si el ciudadano no está dispuesto a aceptar ningún daño permanente ante la peor condición establecida por el código, la estructura deberá diseñarse para que ante tal escenario se comporte totalmente en el rango elástico. Claramente esto implicará un costo inicial más elevado, pero el ciudadano podrá dormir tranquilamente el resto de sus días, y de ocurrir el peor escenario sísmico contemplado por el código, habrá evitado tener que invertir recursos económicos en la demolición de su estructura y la construcción o compra de una estructura nueva, recursos que usualmente no se tienen y termina el ciudadano literalmente quedándose en la calle. El proveer un mínimo de 2% de área seccional de paredes estructurales con respecto al área de piso en ambas direcciones ortogonales bien distribuidas (**ver Figura #1**) pudiera ser suficiente en la inmensa mayoría de los casos para alcanzar este objetivo. A esta razón de área de paredes estructurales al área de piso se le conoce como “Índice de Paredes.” Otros niveles de desempeño como “*ocupación inmediata*” y “*salvar vidas*” pueden ser consideradas con un costo inicial menor que el elástico pero podrán requerir una rehabilitación sísmica mínima, y mayor, respectivamente. Es fundamental que el ingeniero ponga sobre la mesa las cuatro opciones con las consecuencias y costo aproximado de cada una.

Otro aspecto que el ciudadano debe estar consciente es que el código es un documento dinámico, pues se modifica periódicamente según se amplía el conocimiento en la comunidad científica, y que es responsabilidad del ingeniero ser más estricto que el código cuando viene a conocimiento de las deficiencias del mismo.



% de paredes - Dirección N-S

$$\frac{3 L_1 t_1}{B W} \times 100 \geq 2.0$$

% de paredes - Dirección E-O

$$\frac{2 (L_2 t_2 + L_3 t_3)}{B W} \times 100 \geq 2.0$$

Figura #1. Cálculo de porcentaje de área seccional de paredes estructurales con respecto al área de planta en ambas direcciones ortogonales (Índice de Paredes).

MAPA DE PELIGROSIDAD SÍSMICA DE PUERTO RICO

La **Figura #2** muestra el mapa de aceleración máxima del suelo (en % de g) para un 2% de probabilidad de excedencia en 50 años [6], equivalente a un periodo de retorno de 2,475 años, que fue incorporado en el código de edificación de Puerto Rico en el 2003 y al día de hoy sigue vigente a pesar de la evidencia contundente de la existencia de varias fallas sísmicas adicionales. Se espera que haya una nueva versión para los próximos meses.

Se pudiera considerar, desde un punto de vista ingenieril, que el proceso de desarrollo de un mapa de peligrosidad sísmica consta de tres aspectos primordiales. A saber; a) la identificación, localización y caracterización de las fallas sísmicas, b) el desarrollo de ecuaciones de atenuación de ondas sísmicas, y c) el estudio de los efectos locales del sitio de interés. En los próximos párrafos se hará un esfuerzo por explicar estos tres aspectos.

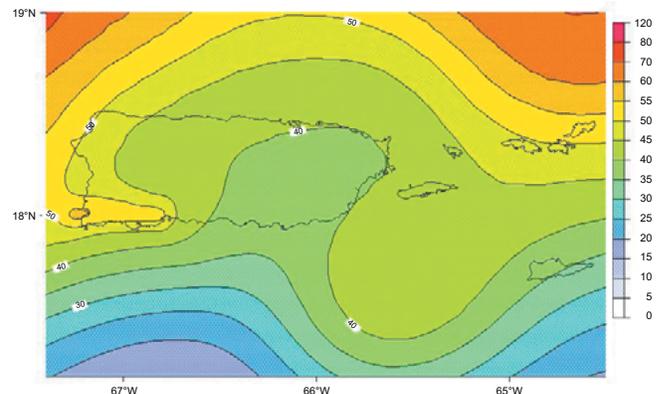


Figura #2. Mapa de Peligrosidad Sísmica de Puerto Rico (2003). Aceleración máxima del suelo para 2% de probabilidad de excedencia en 50 años [6].

IDENTIFICACIÓN, LOCALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS FALLAS SÍSMICAS

En la década de los 1980's se consideraba que, aunque la isla de Puerto Rico estaba rodeada de fallas sísmicas; al norte la Trincheras de Puerto Rico, al este el Canal de Anegada, al sur la Depresión de Muertos, y al oeste el Cañón de Mona, la isla per sé estaba en una sola pieza. Los estudios realizados por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) para el año 2000 Prentice et. al., [10] identificaron una falla sísmica activa que entra por la Bahía de Boquerón y se extiende hacia el Valle de Lajas, con posibles salidas por la Bahía de Guánica y por la Bahía de Guayanilla. Como puede observarse en la **Figura #2**, este hallazgo de la primera falla dentro de la isla influenció severamente el Mapa de Peligrosidad Sísmica del 2003.

Es evidente que existen varias otras fallas sísmicas dentro de la isla. Sin embargo, para que estas sean incorporadas en el Mapa de Peligrosidad Sísmica debe haberse identificado claramente la localización de la falla, el mecanismo de falla

(subducción, normal, de escurrimiento o qué combinación), debe que haber un estudio inequívoco que determine que la misma está activa, estudios adicionales deben proveer un estimado razonable de la magnitud máxima del terremoto que dicha falla puede generar y la frecuencia con que este y terremotos de menor magnitud puedan ocurrir. Estos estudios urgen para múltiples fallas.

En el 2012 el Buró de Reclamación halló una “nueva” falla sísmica en jurisdicción del municipio de Juana Díaz, específicamente entre los Rio Cañas y Rio Descalabrado. El estudio reveló, sin lugar a dudas, que la misma está activa pues, al igual que la falla hallada en Cabo Rojo en el 2000 por el USGS, se halló evidencia de dos terremotos que rompieron la superficie en los últimos 10,000 años. Se han estado realizando estudios posteriores para determinar la magnitud máxima que pudiera esperarse y la frecuencia de dichos sismos. De hecho, cierta evidencia sugiere que esta falla entra por Salinas y se una a la Falla San Marcos en la Represa Cerrillos en Ponce. Hay muy altas expectativas de que esta falla sea incorporada en el nuevo Mapa de Peligrosidad Sísmica del 2025. La **Figura #3** se extrajo del artículo publicado en el Boletín de la Sociedad Sismológica de América en el 2018 por los líderes de los estudios llevados a cabo en Juana Díaz [9]. Esta figura identifica múltiples estudios que se han llevado a cabo sobre los aspectos sísmicos en Puerto Rico siendo una fuente de información crucial para los interesados en estudios sismológicos completados sobre la isla.

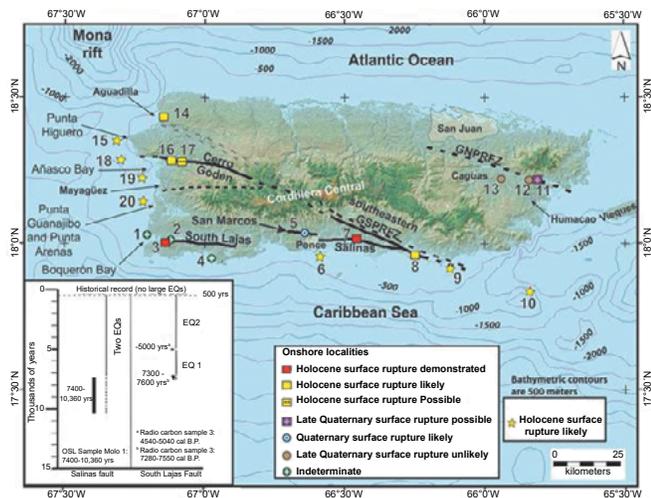


Figura #3: Mapa de Fallas Sísmicas estudiadas en PR (Piety, et al., 2018 [9])

La Falla de Punta Montalva ha estado siendo estudiada, por muchos años, por un equipo de investigadores del Departamento de Geología de la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez (UPRM) y se considera que pudo haber sido la causante del terremoto de M 5.8 ocurrido el Día de Reyes del 2020, y que pudo haber sido previsor del ocurrido al día siguiente de M 6.4 en la Bahía de Guayanilla. Estos terremotos han generado un enorme interés en la comunidad científica para estudiar los aspectos sismológicos de la

isla. En abril de 2023 un grupo de científicos del USGS, en colaboración con investigadores de la UPRM, anduvieron estudiando la posible relación entre la Falla de Punta Montalva y la hallada en Cabo Rojo en el 2000. En estos estudios de campo se hallaron, sin lugar a dudas, tres fallas sísmicas; una al norte del poblado de La Parguera, otra inmediatamente al norte de la Bahía Luminiscente y una tercera en la finca que colinda por el este con el puerto del aerostato. Múltiples estudios adicionales serán necesarios para poder explicar qué sucede por toda esa zona suroeste de Puerto Rico donde se ha determinado que el sismo del 7 de enero de 2020 ha generado más de 180,000 réplicas.

En los primeros meses del 2023 un avión mapeó todo Puerto Rico con un magnetómetro con el propósito de generar un Mapa de Susceptibilidad Magnética. Dicho mapa, entre otras cosas, ayudará significativamente a identificar fallas sísmicas para su posterior estudio a fondo. Otros estudios sismológicos están siendo seriamente considerados para llevarse a cabo próximamente.

Desde el punto de vista ingenieril, la falla que pudiera generar un mayor impacto en los espectros elásticos de diseño es la Gran Zona de Fallas del Sur de Puerto Rico (GSPRFZ), ver **Figura #3**, pues entra por los predios de la Central Aguirre en Salinas, corre por los pueblos de Santa Isabel, Juana Díaz, Ponce, Adjuntas donde se ramifica en tres partes; una ramificación sigue por los municipios de Lares, San Sebastián, Moca y sale al mar por el Río Culebrinas entre Aguadilla y Aguada, una segunda cruza los municipios de Lares, Las Marías y sale por Añasco y se denomina Cerro Goden, y una tercera que sale entre Mayagüez y Cabo Rojo. Esta falla se extiende hacia el mar en ambos extremos y tiene por lo menos 120 km de largo, lo que de romper toda de un solo golpe pudiera generar terremotos de M 8.0 dentro de la isla. Sin embargo, algunos científicos consideran poco probable que, de estar activa, rompa todo el tramo. Una trinchera fue abierta al norte de la autopista PR-52 km 70.3, jurisdicción de Salinas en abril de 2024 y se halló la falla con clara evidencia de la ocurrencia de dos terremotos que han roto la superficie. Se tomaron muestras de rocas para determinar fechas aproximadas de la ocurrencia de dichos terremotos y se está en espera de dichos resultados.

Por otro lado, estudios realizados en la Gran Zona de Fallas del Norte de Puerto Rico (GNPRFZ), ver **Figura #3**, que entra por el municipio de Naguabo y se pudiera extender hasta San Juan, no han podido confirmar que la misma esté inactiva. De modo que, probablemente el nuevo Mapa de Peligrosidad Sísmica simplemente incorpore una zona de fallas activas desde Cabo Rojo hasta Salinas, pero no incorpore aún, en esta nueva versión, toda la extensión de la GSPRFZ y mucho menos la GNPRFZ.

DESARROLLO DE ECUACIONES DE ATENUACIÓN DE ONDAS SÍSMICAS

El segundo aspecto primordial; el desarrollo de ecuaciones de atenuación de ondas sísmicas está, para efectos prácticos, satisfactoriamente atendido. Estas ecuaciones fueron desarrolladas como parte de los estudios doctorales de Claros [3]. Son las

primeras ecuaciones de predicción del movimiento del suelo (GMPE) cuyos datos utilizados provienen en su totalidad de las redes sísmicas locales; la Red Sísmica (PRSN) y la Red de Movimiento Fuerte de Puerto Rico (PRSMP). Se desarrollaron dos ecuaciones; una para los sismos más llanos generados en la corteza terrestre hasta una profundidad de 25 km, y otra para sismos generados a mayor profundidad de 25 km. Con estas ecuaciones y dada la magnitud del sismo, la distancia hipocentral, y tomando en consideración los efectos de sitio, entre otros, se predice tanto los espectros elásticos, la aceleración y la velocidad máxima del suelo en el sitio de interés.

ESTUDIO DE LOS EFECTOS LOCALES DEL SITIO (VS30)

El tercer aspecto primordial se refiere al estudio de los efectos locales de sitio. Hace unas décadas, en el segundo aspecto, se desarrollaban ecuaciones de atenuación de ondas sísmicas en roca, y las variaciones de sitio eran posteriormente consideradas usando localmente estudios de V_{s30} en el área de sismología o usando el programa de computadora *Shake* en el área de ingeniería. Hoy día, en el campo de la sismología, se ha sustituido la ecuación de atenuación de ondas por las ecuaciones de predicción del movimiento del suelo integrando los efectos de sitio por medio de los estudios de V_{s30} . Al momento se han llevado varias campañas de estudios de V_{s30} en Puerto Rico como el de **Odum et. al, 2013** [7] que estudió 27 localidades. En el 2021 el PRSMP llevó a cabo una campaña para realizar estudios de V_{s30} en unas 12 estaciones de movimiento fuerte, y otras 20 en el 2024, estudios que deben publicarse próximamente, y en el 2022 el USGS, en colaboración con científicos de la UPRM, realizó una campaña de 25 lugares, primordialmente en donde hay estaciones sísmicas ya sean con sismógrafos de banda ancha o con acelerómetros. La variación en tipos de suelos en PR es tal que siempre se sugiere realizar estudios de suelos particulares que determinen las diversas capas de suelo y sus propiedades, incluyendo el periodo fundamental de vibración del suelo y el perfil de velocidad de onda S en los primeros 30 metros de profundidad, y clasificar el suelo según el Programa Nacional de Reducción de Peligro Sísmico (NEHRP).

En resumen se puede concluir que básicamente está atendido el segundo aspecto de las ecuaciones de predicción de movimiento del suelo, las cuales requieren de más estudios de sitio (V_{s30}), que es el tercer aspecto de relevancia, para ir reduciendo la incertidumbre de las ecuaciones. Lo fundamental, lo que realmente puede hacer una diferencia sustancial en el cálculo de las cargas sísmicas de diseño, y que claramente hace falta mucho trabajo por realizar, es determinar si la GSPRFZ está activa o no y, de estarlo, cuál sería la magnitud máxima que pudiera generar y cuan frecuente serían los sismos de diversas magnitudes en dicha falla. Por este motivo, en el Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura de la UPRM se llevó a cabo un estudio de toda la zona de responsabilidad de la PRSN para determinar el espectro de diseño elástico considerando todas las fallas sísmicas potencialmente activas. La **Tabla #1** [4] muestra los

resultados de los espectros de diseño elástico sugeridos por el estudio comparados con los espectros de diseño elástico sugeridos por la ASCE 7-16 y vigentes en el actual código de edificación. Se exhorta a los ingenieros en PR utilizar el valor mayor entre el estudio de la UPRM y el del ASCE 7-16 [1]. Así el ingeniero podrá garantizar que está tomando en consideración para su diseño, las fallas de GSPRFZ y la de GNPRFZ. Note que el estudio de la UPRM obtuvo, en términos generales, espectros de diseño mayores, siendo el de mayor diferencia el de la ciudad de Ponce donde las aceleraciones en la meseta del espectro (S_{Ds}) más que se duplican.

#	Ciudad	PGA		S_{Ds} (g)		S_{D1} (g)	
		Estudio	ASCE 7-16	Estudio	ASCE 7-16	Estudio	ASCE 7-16
1	Ponce	0.63	0.41	1.46	.69	0.39	0.27
2	Vieques	0.63	0.42	1.31	0.69	0.39	0.25
3	Maunabo	0.63	0.39	1.31	0.65	0.39	0.23
4	Mayaguez	0.63	0.47	1.31	0.82	0.38	0.32
5	Utua	0.63	0.42	1.31	0.71	0.38	0.28
6	Cabo Rojo	0.49	0.50	1.20	0.82	0.32	0.33
7	Culebras	0.47	0.44	1.16	0.73	0.30	0.27
8	Caguas	0.50	0.38	1.13	0.63	0.37	0.24
9	Aguadilla	0.38	0.49	0.98	0.87	0.30	0.33
10	San Juan	0.43	0.41	0.97	0.66	0.38	0.27
11	Fajardo	0.43	0.40	0.92	0.66	0.30	0.25
12	Arecibo	0.36	0.43	0.69	0.75	0.20	0.29

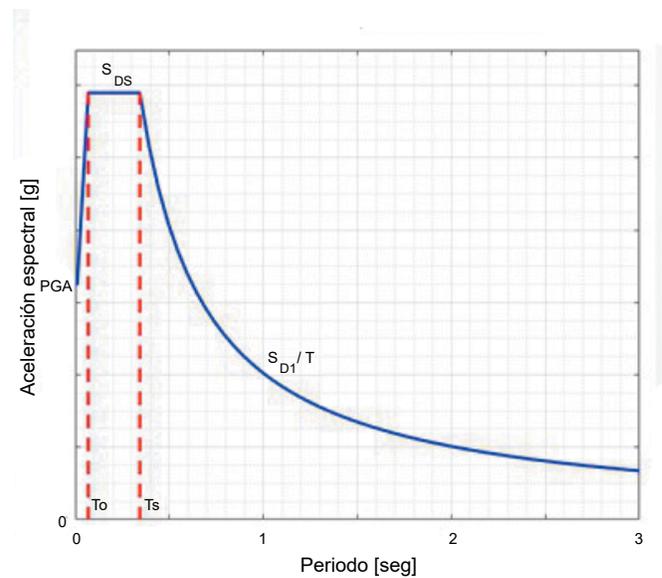


Tabla #1: Comparación de los Espectros de Diseño Elástico Sugeridos [4] vs los establecidos por ASCE 7-16 [1].

ALGUNAS ESTRUCTURAS QUE DEBEN ATENDERSE CON PREMURA

Un breve recorrido sobre la situación de vulnerabilidad de un puñado de estructuras de gran relevancia en la sociedad como lo son los hospitales, las escuelas, las casas en zancos y las represas, y cómo se pudiera reducir significativamente esa vulnerabilidad y por ende el riesgo se presenta a continuación.

ESTRUCTURAS HOSPITALARIAS

Los hospitales tienden a ser las estructuras de mayor demanda inmediatamente después del azote de un huracán o un terremoto u otro fenómeno natural. Es imprescindible su disponibilidad inmediatamente después del evento natural. No se puede esperar nada de tiempo para arreglar elementos estructurales agrietados, ni tan siquiera recoger elementos no estructurales rotos o esparcidos por el piso. Es un momento de urgencia donde cada minuto cuenta y hace la diferencia entre la vida y la muerte para un sinnúmero de pacientes malheridos. Por tal motivo los hospitales tienen que ser diseñados y construidos con la meta en mente de que se mantengan en el rango elástico durante todo el evento máximo esperado. Para ello el diseñador debe considerar como mínimo: a) amarrar todas las fundaciones perimetrales o preferiblemente considerar una fundación de balsa (también llamada losa de cimentación), b) proveer un mínimo de 2% de área seccional de paredes estructurales con respecto a la planta en ambas direcciones ortogonales en cada piso, c) una distribución de paredes estructurales que mantenga simetría en ambas direcciones ortogonales para minimizar la torsión y que se distribuya por toda la planta en lugar de concentrarlas en una pequeña zona, y d) colocar paredes estructurales en la periferia del hospital pues son más efectivas reduciendo la torsión. La estructura hospitalaria, una vez diseñada con tal rigidez, debe ser colocada sobre aisladores de base para reducir sustancialmente las cargas sísmicas sobre la misma. La experiencia tanto en el terremoto de Chile del 2010, como en el más reciente en Turquía (2023) demuestra un desempeño extraordinariamente bueno de los hospitales montados en aisladores de base. Tan buena es la experiencia que en Chile todo nuevo hospital tiene que ser diseñado y construido sobre aisladores de base. Por último, es fundamental que todos los elementos no estructurales; maquinarias, neveras, camas, estantes, etcétera, se fijen a la estructura para minimizar el reguero que queda esparcido por el suelo.

ESTRUCTURAS ESCOLARES

Las estructuras escolares en el trópico son muy particulares. Usualmente son estructuras rectangulares de dos plantas pero pueden variar de una a cuatro plantas. Cada planta tiene usualmente entre cuatro y ocho salones de clases. Cada salón de clase ronda por los 600 pies cuadrados, y un pasillo lateral de entre seis y diez pies de ancho. Desde el punto de vista estructural tiene paredes estructurales o de mampostería en la dirección transversal, y dos marcos resistentes a momento en la dirección longitudinal; uno de ellos separa el

salón de clases del pasillo. Para lograr esta separación se coloca una pared de mampostería a cada lado de la columna que alcanza como dos terceras parte de la altura de la columna restringiendo parcialmente su movimiento lateral cuando ocurre un evento telúrico. Esta restricción de movimiento lateral provoca que los esfuerzos cortantes en la columna se incrementen mucho más rápido que el incremento en flexión generando una falla frágil por cortante, y frecuentemente un colapso repentino de la estructura escolar.

Este escenario en las estructuras escolares debe inmediatamente ser mitigado cortando verticalmente, a lado y lado de la columna acortada, unas dos pulgadas de la pared de mampostería para permitir el desplazamiento lateral de la columna durante un evento telúrico. Sin embargo, usualmente este trabajo de mitigación queda lejos de ser suficiente para obtener un desempeño apropiado de la estructura [8]. Estructuras escolares diseñadas y construidas sin las provisiones de ductilidad que fueron incorporadas en el código del ACI-318 del 1983 (y en Puerto Rico en su código de 1987), no tienen la capacidad de desplazamiento lateral que hoy día los códigos exigen, por lo que es mandatorio una rehabilitación sísmica de la misma.

Como la estructura escolar tiene una ínfima capacidad de desplazarse lateralmente, tendríamos en principio dos formas de atender este problema; a) o se le provee la capacidad necesaria de desplazarse lateralmente, o b) se le restringe el desplazamiento lateral. El aumentar la capacidad de desplazarse lateralmente a una estructura de marcos de hormigón armado se hace regularmente en la etapa de diseño; colocando aros en juntas y columnas, y estribos en vigas a una pequeña separación, usualmente de 3 a 4 pulgadas; aumentando el área seccional total del refuerzo transversal; aumentando la capacidad del hormigón; e incrementando el peralte de las vigas. Sin embargo, una vez construido el marco es prácticamente imposible llevar a cabo esta tarea. Por tal motivo la solución práctica estriba en restringir la demanda de desplazamiento lateral lo cual se obtiene introduciendo paredes estructurales en la dirección longitudinal y de forma simétrica. Estudios recientes realizados en la UPRM [2] demuestran que un índice de paredes en cada la dirección del 2%, 1.5%, 1%, y 0.5% llevan aproximadamente a la estructura escolar a niveles de desempeño elástico, de "ocupación inmediata", de "salvar vidas" y de "prevención de colapso", respectivamente. Mientras que un índice de paredes de 0% (que es usual en la dirección longitudinal) expone a un colapso total a la estructura escolar. Ver **Figura #1**.

Las paredes estructurales utilizadas para resistir carga sísmica deben tener; diseñada su propia fundación; un ancho mínimo de ocho pulgadas, pero preferiblemente diez pulgadas; doble cortina de acero para proveerle estabilidad a la misma; cada una de las dos cortinas de acero con un mínimo de varillas de acero de #3@9" o #4@16"; hormigón de una resistencia mínima de 4,000 libras por pulgada cuadrada; y el hormigón debe ser vertido con plastificadores o con vibradores. Por otro lado, hay que asegurarse que la pared estructural quede firmemente adherida a la estructura

para proveer una transferencia de carga apropiada y, no se les debe pasar tuberías internas (ni pluviales, ni sanitarias, ni eléctricas) pues le reducen significativamente su capacidad a resistir cargas sísmicas.

Por último, debe señalarse que el enfoque de abrigar la llamada columna corta ya sea con abrigos de acero o con fibras de carbón o de vidrio es errado, pues ni restringe el desplazamiento lateral de la estructura ni provee una capacidad adicional significativa de desplazamiento lateral a la estructura.

ESTRUCTURAS RESIDENCIALES SOBRE COLUMNAS ESBELTAS

El caso de las estructuras residenciales sobre columnas esbeltas, comúnmente llamadas “zancos”, es realmente preocupante. Un estudio realizado en la UPRM [11] demostró que absolutamente todas las casas típicas en zancos colapsarían de ser sometidas al evento telúrico establecida por el código de principios del milenio. Como muestra de la vulnerabilidad de estas estructuras se señala que durante el terremoto previsor de M 5.8 ocurrido el 6 de enero de 2020 en la costa del pueblo de Guánica colapsaron solo unas seis estructuras, todas estaban sobre zancos. En el caso de las casas en las laderas la situación se empeora por la torsión que provoca la única pared paralela a la calle que usualmente se construye como parte del soporte frontal de la casa. Este, al igual que el caso de las estructuras escolares, es una situación que se debe resolver restringiendo el desplazamiento lateral de los zancos. Una solución a esta condición fue plasmada en la referencia [5].

REPRESAS

En Puerto Rico hay unas 37 represas alrededor de toda la isla. La inmensa mayoría de ellas fueron diseñadas y construidas antes de que se desarrollaran las provisiones sísmicas que se generaron a raíz del terremoto de San Fernando, California (1971). Estas represas debieran ser sísmicamente analizadas ante los nuevos escenarios de amenaza sísmica que se vislumbran. Se deben reevaluar los análisis de rotura de represa; contemplar una rehabilitación sísmica para todas aquellas que las requieran, y por lo pronto, diseñar y establecer sistemas de alerta temprana en todas las comunidades que viven río abajo y que están expuestas a inundación en caso de la rotura de la represa. Actualmente el PRSMP tiene doce represas sísmicamente instrumentadas, a algunas de ellas se le han realizado análisis sísmicos pero no se han contemplado proyectos de rehabilitación sísmica. Por otro lado, los esfuerzos realizados para establecer un sistema de alerta temprano, al momento, han sido infructuosos.

CONCLUSIÓN

El código de edificación de Puerto Rico corriente tiene como mayor deficiencia el Mapa de Peligrosidad Sísmica pues, debido a la falta de estudios geofísicos, no incluye múltiples fallas existentes, y lo más probable es que algunas de ellas tampoco sean incluidas en la nueva versión del mapa para el 2025. Un estudio reciente [4] concluye que, de

estar activas estas fallas, las cargas sísmicas con que habría que diseñar las estructuras pudieran más que duplicarse en algunos municipios. Es responsabilidad del ingeniero incluir el potencial efecto de estas fallas sísmicas hasta que se demuestre inequívocamente que las mismas están inactivas. Además, el ingeniero debe explicar a su cliente del alto nivel de daños que la estructura a ser diseñada tendrá si se diseña meramente satisfaciendo los requisitos mínimos del código y la consecuencia subsiguiente de la demolición de la misma. Una exhortación a diseñar en el rango elástico o por lo menos a nivel de “ocupación inmediata” debiera ser mandatorio.

Por otro lado, los hospitales deben diseñarse de modo que se mantengan en servicio de forma continua aún pasado el mayor evento telúrico esperado. Esto requiere de diseñar la estructura con una rigidez equivalente al provisto por un 2% de área seccional de paredes con respecto al área de piso en ambas direcciones ortogonales, y debieran cimentarse sobre aisladores de base. Mientras que, tanto las escuelas como las casas sobre zancos deben rehabilitarse minimizando la demanda de desplazamiento lateral por medio de rigidizar sustancialmente la estructura. Por último, las represas deben analizarse bajo el nuevo escenario sísmológico, rehabilitar sísmicamente aquellas que así lo requieran y, mientras tanto, proveer sistemas de alerta temprana a los residentes que viven río abajo en caso de que alguna represa colapse.

REFERENCIAS

1. ASCE/SEI. (2017). Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (7-16). American Society of Civil Engineers.
2. Castillo Sainz, J., “Rehabilitación de Escuelas: Relación entre el Porcentaje de Muros de Hormigón Reforzado y el Desempeño Estructural,” Tesis de Maestría, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico en Mayagüez, Julio, 2024.
3. Claros-Gómez, D. F., “Ground Motion Prediction Equations for Puerto Rico,” PhD dissertation, University of Puerto Rico at Mayagüez, 2022.
4. Martínez-Cruzado, J. A., Suárez-Colche, L. E., and López-Fajardo, J. (2023). “Development of an Alternative Elastic Design Spectra for 12 Municipalities in Puerto Rico,” Seismological Society of America, Annual Meeting, Keynote Presentation, April 17, 2023
5. Martínez-Cruzado, J. A., López-Rodríguez, R. R., and González-Avellanet, Y., “Rehabilitación Sísmica de Casas en Zancos,” Programa de Movimiento Fuerte de Puerto Rico, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de

Puerto Rico en Mayagüez, pp. 36, 2013. ISBN: 978-1-934325-99-5, <https://www.caborojopr.net/> o <https://ecoexploratorio.org>

6. Mueller, C. S., Frankel, A. D., Petersen, M. D., & Leyendecker, E. V. (2003). "Documentation for 2003 USGS seismic hazard maps for Puerto Rico and the US Virgin Islands," US Geological Survey Open-File Report, 3(379), 2-2. <https://doi.org/10.3133/ofr03379>
7. Odum, J. K., Stephenson, W. J., Williams, R. A., & von Hillebrandt-Andrade, C. (2013). "Vs30 and Spectral Response from Collocated Shallow, Active-, and Passive-Source Vs Data at 27 Sites in Puerto Rico." Bulletin of the Seismological Society of America, 103(5), 2709-2728. <https://doi.org/10.1785/0120120349>
8. Ordoñez Agudelo, A. P., "Rehabilitación Sísmica de Estructuras Escolares Diseñadas sin Detalles de Ductilidad," Tesis de Maestría, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico en Mayagüez, Diciembre, 2024.
9. Piety, L. A., Redwine, J. R., Derouin, S. A., Prentice, C. S., Kelson, K. I., Klinger, R. E., and Mahan, S., (2018), "Holocene Surface Ruptures on the Salinas Fault and Southeastern Great Southern Puerto Rico Fault Zone, South Coastal Plain of Puerto Rico," Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 108, No. 2, pp. 619-638.
10. Prentice, C. S., & Mann, P. (2005). *Paleoseismic study of the South Lajas fault: First documentation of an onshore Holocene fault in Puerto Rico*. Geological Society of America. Special paper 385, pp 215-222.
11. Vázquez Torres, D., "Seismic Behavior and Retrofitting of Hillside and Hilly Terrain R/C Houses Raised on Gravity Columns," PhD dissertation, University of Puerto Rico at Mayagüez, 2002.

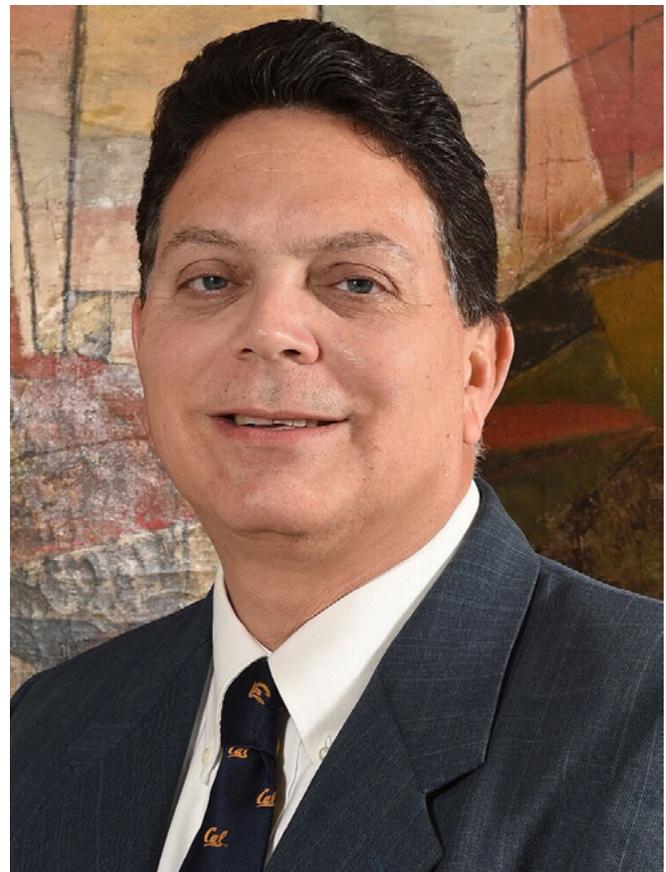
RESEÑA

Obtuvo tanto su Bachillerato como su Maestría en Ciencias de Ingeniería Civil de la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez, su Maestría en Ingeniería y Doctorado de Filosofía en Ciencias de Ingeniería Civil de la Universidad de California en Berkeley en donde se especializó en el diseño sismo-resistente de estructuras de hormigón armado. Lleva

31.5 años como profesor del Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura de la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez desde donde dirige el Programa de Movimiento 12 Fuerte de Puerto Rico con 117 estaciones sísmicas en Puerto Rico (100), Islas Vírgenes Británicas (10), República Dominicana (5), Islas Vírgenes Americanas (1), y Anguila (1) y 20 estructuras sísmicamente instrumentadas entre edificios (6), represas (12) y puentes (2).

Ha realizado visitas de reconocimiento después de los terremotos de Ciudad México, México (1985), San Salvador, El Salvador (1986), Loma Prieta, California (1989), Cape Mendocino, California (1992), Cariaco, Venezuela (1997), Puerto Plata, República Dominicana (2002), Ica, Perú (2007), y Concepción, Chile (2010).

Es miembro del Instituto Americano del Concreto (ACI), de la Sociedad Sismológica de América (SSA), del Consorcio de Sistemas de Organizaciones de Movimiento Fuerte (COSMOS), y de la Comisión de Terremotos del Colegio de Ingenieros y Agrimensores de Puerto Rico (CIAPR). Recientemente fue galardonado con el Bruce A. Bolt Medal Award 2023 por parte del Instituto de Investigación de Ingeniería de Terremotos (EERI), el SSA y COSMOS.





CARENTEC

D-9 Villa Beatriz, Manatí PR, 00674
tel. (787)884-0497 / 3355
fax. (787)854-7241



TAB

Our experience and
proficiency makes us the
**BEST HVAC SOLUTIONS
PROVIDER**
in Puerto Rico

CPT



Our Services include:

TAB

Testing and Balancing
of HVAC and Hydronic Systems

CPT

Cleanroom Certification (ISO 14644)
HEPA testing and certification



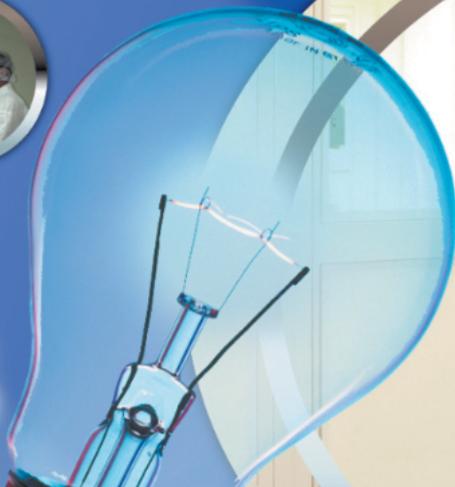
**Commissioning
and
Validation**

Commissioning
of HVAC, USP Water, and Facilities
Validation



HEPA
testing and
certification

SERVICES



Certification Nos. 3291
CR167

EL ROL DE LA AGRIMENSURA FRENTE A LOS DESASTRES NATURALES

Agrimensor Víctor M. Seda Figueroa

ABSTRACTO

En los últimos años, nuestra isla ha sido afectada grandemente por desastres naturales de mayor magnitud. Uno de ellos ocurrió el 20 de septiembre de 2017. El huracán María hace entrada a la isla de Puerto Rico como uno categoría 4, con vientos sostenidos de 155 millas por hora y con ráfagas de hasta 200 millas por hora. El huracán dejó unas 40 pulgadas de precipitación, según el Centro Nacional de Meteorología. Este fenómeno atmosférico dejó al 100% de la isla sin servicio de electricidad. El 60% de los clientes de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA) se quedaron sin suministro de agua potable. Hubo un colapso total de las telecomunicaciones. Los daños causados por María fueron estimados en unos \$100,000 millones de dólares, según cifras ofrecidas por el gobierno de Puerto Rico. Fue necesario el uso de técnicas de agrimensura y topografía para poder realizar los trabajos de reparación de los daños causados por el huracán. Otro evento que afectó a Puerto Rico lo fue el terremoto de 2020. El 7 de enero de 2020 el área sur y suroeste de la Isla fue afectada, por un terremoto de magnitud de 6.4 en la escala de Richter, según datos ofrecidos por la Red Sísmica de Puerto Rico, que resultó en el desplazamiento de varias estaciones de referencia operando de forma continua CORS, por sus siglas en inglés. Gracias a la intervención de la agrimensura en estos proyectos de emergencia y el impacto positivo de la práctica de esta profesión, se pudo lograr una rápida recuperación, de manera segura y costo-efectiva ante estos desastres.

MAGNITUD DE DAÑOS DEL HURACÁN MARÍA

El primer caso relata los hechos ocurridos el 20 de septiembre de 2017, el huracán María hace entrada a la isla de Puerto Rico como uno categoría 4, con vientos sostenidos de 155 millas por hora y con ráfagas de hasta 200 millas por hora. El huracán dejó unas 40 pulgadas de lluvia acumulada. Los ríos Grande de Loíza, Grande de Manatí, Río Grande de Añasco y Río Grande de Arecibo, así como el río La Plata, entre Comerío y Bayamón, el río Cibuco en Corozal, el río Espíritu Santo en Río Grande, el río Guayama, el río Piedras, el río Guanajibo y el río Puerto Nuevo se desbordaron y causaron inundaciones en la mayoría de los 78 municipios de la Isla, según cifras ofrecidas por el gobierno de Puerto Rico. Este fenómeno atmosférico dejó al 100% de la Isla sin servicio de electricidad. El 60% de los clientes de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA) se quedaron sin suministro de agua potable, según la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico. Hubo un colapso total de las telecomunicaciones. Los daños causados por María fueron estimados por el gobierno de Puerto Rico en unos \$100,000 millones de dólares. Las lluvias torrenciales

y los vientos intensos a causa del huracán María provocaron la ruptura y colapso del aliviadero del embalse Guajataca, que es por donde fluirá el agua en exceso sobre el límite de inundación de la represa en casos de descarga. En las imágenes presentadas en las figuras 1 y 2 se puede apreciar la extensión y trayectoria del fenómeno atmosférico en su paso por nuestra región.

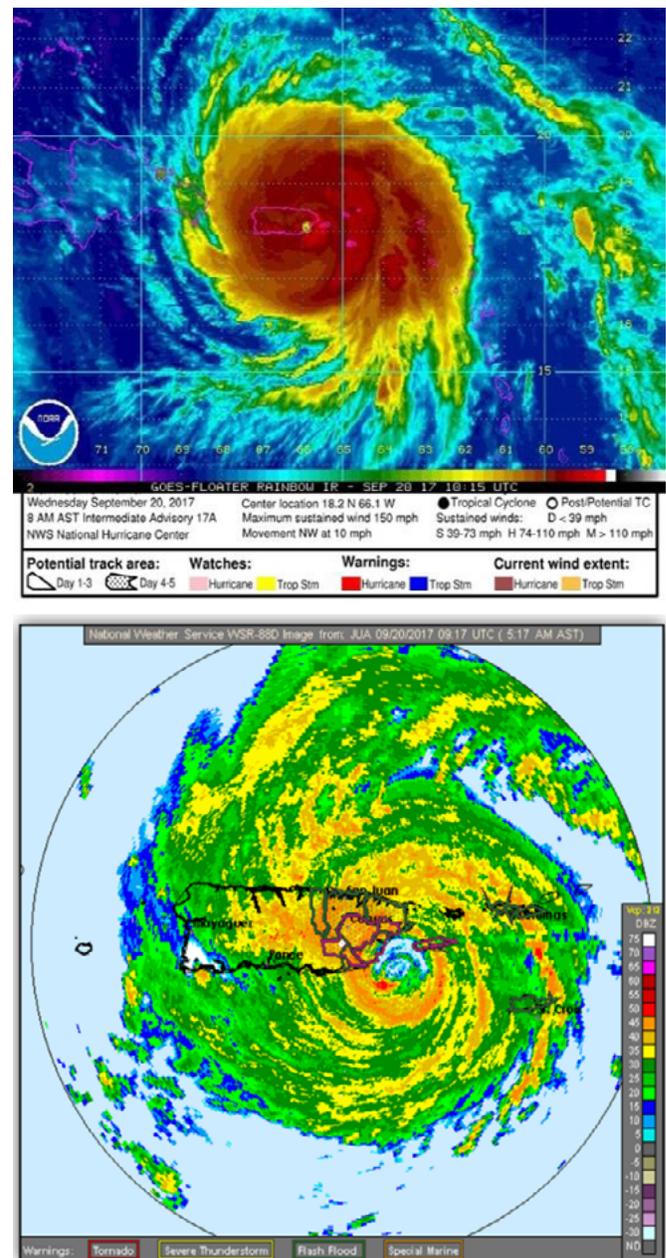


Figura 1: Imágenes del Huracán María – 20 de septiembre de 2017 (Fuente: NOAA)



Figura 2: Trayectoria del Huracán María a su paso por Puerto Rico (Fuente: NOAA)

EMBALSE GUAJATACA

El Embalse Guajataca está ubicado entre los municipios de Quebradillas, San Sebastián e Isabela. Este sirve a cerca de 200,000 residencias, según cifras ofrecidas por la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico. Sus aguas son utilizadas para el consumo de casi todas las poblaciones del noroeste de Puerto Rico y para el sistema de riego que se extiende hasta los pueblos de Moca y Aguadilla. El embalse Guajataca tiene una capacidad de captación normal de 34,276 acre-pies, con una profundidad máxima de aproximadamente 65 pies y una longitud de casi 5 millas, según la Autoridad de Energía Eléctrica de Puerto Rico. Dicho embalse es propiedad de la Autoridad de Energía Eléctrica (AEE), pero su principal cliente es la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA). El embalse fue construido entre el 1919 y 1928 bajo el mando del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE) a un costo original de aproximadamente \$700,000.00, según el Cuerpo de Ingenieros del ejército de los Estados Unidos.



Figura 3: Embalse Guajataca antes del Huracán María (Fuente: AEE)

Al sobrepasar el límite máximo de elevación, en su entrada al aliviadero la corriente de agua extrema provocó el colapso de la carretera estatal PR-119 y el de un puente localizado en la carretera estatal PR-476 aguas abajo de la represa, además de la socavación del aliviadero. En las fotos mostradas a continuación podrán observar el acceso del agua del lago hacia el aliviadero por la parte superior derecha de la figura 4a y su trayecto. En la figura 4b se muestra un helicóptero del ejército de los Estados Unidos depositando barreras de concreto como contrapeso de los terraplenes del aliviadero y para controlar el flujo del agua del lago. En las demás fotos se muestra parte de los daños.



4a



4b



4c



4d

Figura 4. Extensión de daños en el Embalse Guajataca (Cortesía del autor)

TRABAJOS DE AGRIMENSURA Y TOPOGRAFIA

Las brigadas de agrimensura pudieron llegar a la represa pasada ya una semana después del evento. La falta de servicio de energía eléctrica, comunicaciones y el difícil acceso a través de las vías de transportación fue algo que obstaculizó el que pudieran llegar más temprano al lugar. Una vez en el proyecto se les requirió realizar una topografía y preparar un plano de condiciones existentes de toda la represa y sus alrededores. También fue requerido realizar monitoreo de los posibles desplazamientos horizontal y vertical de unos puntos de control previamente establecidos en la parte superior de la represa, así como la localización de la instrumentación de la represa. Los métodos de agrimensura utilizados en el proyecto fueron la estación total, para estudios de mensura y topografía, el nivel y mira para la toma de elevaciones de puntos de control, y el uso de “drones” para hacer estudios de fotogrametría.

RECONOCIMIENTO DEL PROYECTO Y ESTABLECIMIENTO DE PUNTOS DE CONTROL

Al llegar a la zona afectada no tenían los datos de puntos control y, al no tener conexión a internet, no había acceso a la red de referencia virtual (VRS por sus siglas en inglés). Se procedió a crear un sistema local de control utilizando sistema satelital de navegación global (GNSS por sus siglas en inglés) en tiempo real con localización de origen aproximada, la cual podría variar en un rango de entre +3.00 y -3.00 metros en horizontal y vertical, para realizar un polígono de control y comenzar a tomar datos. Se encontraron varios puntos de control oficiales, pero al momento no había acceso a la información de la identificación de cada uno de ellos, las coordenadas y elevaciones de estos. Pasadas 6 semanas hubo acceso a la información de los controles horizontales y verticales y se realizó la transformación de coordenadas correspondiente. Los controles horizontales recibidos estaban referidos al Sistema NAD83 (Datum de América del Norte de 1983), revisión de 1997, y el control vertical estaba referidos a *Mean Sea Level* (Nivel promedio local del mar). Se nivelaron los controles existentes y los establecidos con nivel óptico. Los controles horizontales y verticales fueron establecidos utilizando sistema satelital de navegación global (GNSS por sus siglas en inglés) en tiempo real y unidades de estación total. Se establecieron puntos de control horizontal y vertical realizando observaciones satelitales y realizando cierres de polígonos con precisiones mínimas de 1:25,000. La información relacionada a la topografía y condiciones existentes se levantó en el transcurso de dos semanas después del evento.

Tomar datos topográficos en las zonas del colapso del aliviadero, y por donde continuaba el flujo de agua fue un gran reto para las brigadas de agrimensura. Era una zona de peligro en la que, además de estar dentro del flujo de agua, habría que caminar sobre roca y material suelto. Por tal razón recurrieron al uso de “drones” como método de fotogrametría a manera de comparar información levantada por métodos convencionales de topografía y tener acceso a lugares peligrosos, como por ejemplo sobre las barreras y zonas de roca depositada sobre el área colapsada del aliviadero. También se utilizaron los “drones” de alta resolución para obtener fotos georreferenciadas actualizadas de la obra. Los vuelos para el levantamiento de datos se realizaron utilizando una plataforma no tripulada “drone” DJI Phantom 3 Professional. Se obtuvieron imágenes de alta resolución y se realizaron una serie de vuelos planificados con duración aproximada de 10 minutos cada uno. Se establecieron unas tarjetas sobre el terreno en el proyecto (GCPs por sus siglas en inglés) a las que se le determinaron las coordenadas planas y elevaciones a base de observaciones con el sistema satelital de navegación global (GNSS por sus siglas en inglés) en tiempo real.

Para llevar a cabo los trabajos de topografía requeridos en el proyecto utilizamos los siguientes programas, instrumentos y aplicaciones:

Trimble R6 GNSS Receivers
Leica TCR307 Total Station 5”
Drones made easy for dji – Mission Planner
Agisoft Photoscan – proceso de orto-foto
Global Mapper – Edición de data levantada
AutoCAD 14 con Carlson Civil – dibujo y plano en formato Dwg

Después de reestablecidos los servicios de internet y telefonía celular se procedió con el levantamiento de los controles horizontales y verticales del proyecto utilizando el sistema de referencia virtual de coordenadas (VRS por sus siglas en inglés), el cual realiza las correcciones de coordenadas en tiempo real, para comparar la información con la obtenida en el campo con instrumentos convencionales y con el sistema satelital de navegación global (GNSS) en tiempo real. Se usó además el programa gratuito de fácil acceso del Servicio Geodésico de los Estados Unidos NGS *Coordinate Conversion and Transformation Tool* (NCAT) para transformar los datos tomados con la red virtual VRS obtenidos en el sistema NAD83 (NA2011 EPOCA 2010) a NAD83 (FBN1997).

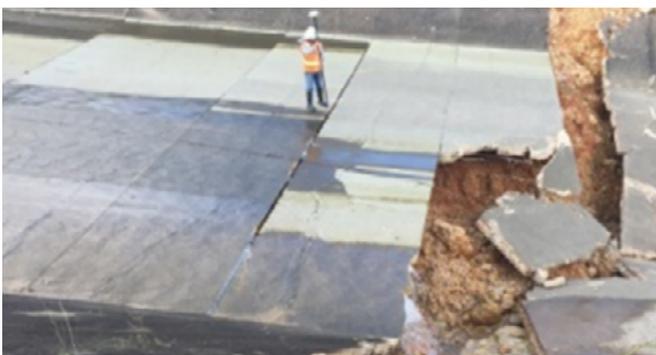


Figura 5: Colapso del aliviadero (Cortesía del autor)

TRABAJOS ADICIONALES DE TOPOGRAFIA REQUERIDOS

Se llevaron a cabo trabajos adicionales requeridos y que se realizaron en el proyecto, que incluyen el replanteo de elementos de interés en las facilidades del aliviadero, como

los barrenos para pruebas de suelos, replanteo de anclajes (*Soil Nails*) para amarrar el aliviadero existente y el replanteo del sifón de 54” que reconectó el canal de derivación, que es mediante el cual se supe agua desde la represa hacia la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados. Todos los datos levantados fueron entregados al Cuerpo de Ingenieros del Ejército para ellos poder realizar los planos de diseño de las obras de reconstrucción.

Gracias a los trabajos de agrimensura y topografía realizados indicados anteriormente y a la pronta intervención del Cuerpo de Ingenieros y el contratista a cargo de la obra, se pudo lograr controlar la situación de emergencia surgida en la represa. El Cuerpo de Ingenieros pudo diseñar sobre la marcha los planos de reconstrucción del aliviadero y el contratista pudo realizar las obras diseñadas.

TERREMOTO

El segundo caso relata los hechos ocurridos el 7 de enero de 2020. En Puerto Rico, la infraestructura geodésica ésta compuesta por una red activa de bases GNSS (por sus siglas en inglés) que operan 24/7. A estas se les conoce como CORS por sus siglas en inglés, *The NOAA Continuously Operating Reference Station*. El 7 de enero de 2020 el área sur y suroeste de la Isla fue afectada, por un terremoto de magnitud 6.4 Mw en la escala Richter, según informado por la Red Sísmica de Puerto Rico, que trajo como consecuencia el desplazamiento de varias estaciones de monitoreo continuo de CORS: PRGY, PRMI, P780 y PRJC, las cuales ya la agencia federal “*National Geodetic Survey*” (NGS por sus siglas en inglés), determinó sus nuevas posiciones y las mismas están publicadas en la página web de dicha agencia (<https://geodesy.noaa.gov/CORS/>).

Las estaciones de monitoreo continuo no fueron las únicas afectadas, sino también las estaciones de control horizontal de ORDEN “B” que se establecieron en 1995 para el proyecto del Centro de Recaudaciones de Ingresos Municipales (CRIM), que están en el área impactada por el movimiento telúrico. El estudio realizado comprendió los municipios de Ponce, Peñuelas, Guayanilla, Yauco, Sabana Grande y el barrio de La Parguera en Lajas.

TRABAJO DE CAMPO

Se compararon las alturas ortométricas determinadas por nivelación geométrica diferencial del Datum vertical de Puerto Rico, (PRVD02) con las alturas ortométricas derivadas por GNSS utilizando el modelo Geoid18, para determinar los desplazamientos verticales (subsistencia, alzamiento y licuefacción) producidos por el terremoto. Del control de Orden “B” (Magas) se identificó subsistencia de 0.148m. El control de orden “B” (Lajas 2) se identificó alzamiento de 0.057m y el control (C1012) se identificó alzamiento de 0.032m. Los demás controles verticales demostraron subsistencia entre 0.002m (D1011) hasta 0.263m (975-8053A). Los desplazamientos horizontales de varios de los controles de ORDEN B fueron entre 10.2cm y 12.5cm.

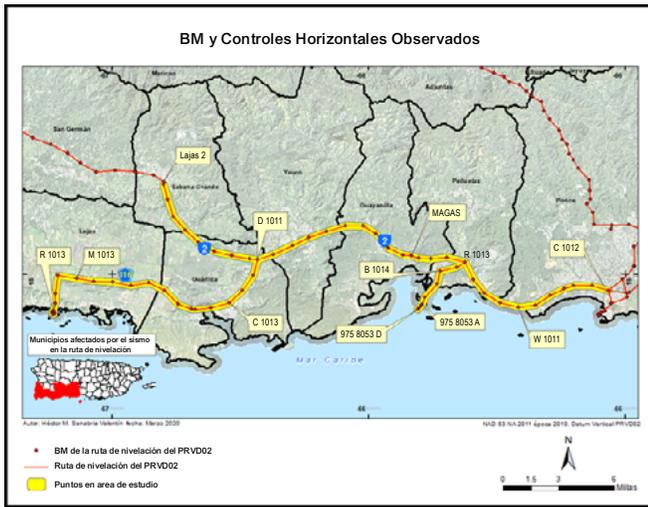


Figura 7: Puntos de control observados y desplazamientos verticales (Fuente: R. Moreno)



Figura 8: Desplazamientos Horizontales (Fuente: R. Moreno)

LECCIONES APRENDIDAS EN AGRIMENSURA

En un desastre natural estaremos desprovistos de muchos recursos y facilidades a las que estamos acostumbrados a utilizar en el día a día de nuestros trabajos de agrimensura. Entre estos la dificultad de acceso a las zonas afectadas, la falta del servicio de energía eléctrica, el racionamiento de la gasolina, la falta de sistemas de Comunicaciones, el sistema de

Red Virtual de Referencia (VRS por sus siglas en inglés) fuera de servicio, dificultad para recargar baterías de los equipos de agrimensura, el no poder hacer uso de servicios en línea para cálculos de coordenadas, y la escasez de alimentos. Al igual que en todos nuestros hogares, las brigadas de agrimensura deben contar con un generador o planta eléctrica pequeña para poder recargar sus equipos.

Nunca pongamos puntos de control y estaciones de monitoreo sobre las estructuras que vamos a estar controlando o monitoreando. En un evento de movimiento como un huracán o un terremoto, si los controles están sobre la estructura afectada tendremos un monitoreo que no es real, ya que con el movimiento de la estructura también se van a mover los controles. Los controles tienen que estar localizados en puntos estratégicos en terreno estable y de fácil acceso, que no solamente sean de comodidad para emplazar nuestros equipos, también tiene que tomarse en consideración otros factores como el mencionado anteriormente. Preferiblemente, los controles deben ser establecidos sobre un monumento que incluya una zapata y un pedestal en hormigón. (Ver figura 6). En proyectos como las represas, puentes y otros tipos de obras de gran importancia es vital tener una red geodésica de puntos de control que se extienda mucho más allá de los límites del proyecto. Esto también lo deberíamos aplicar a proyectos pequeños porque muchas veces hacemos polígonos con muy pocos puntos. Utilice los sistemas de referenciación de coordenadas existentes y disponibles para establecer sus redes geodésicas. Asegúrese de contar con los equipos y programas de computadora que le puedan ayudar a enfrentar situaciones de agrimensura complejas, como por ejemplo el trabajo que realizamos en Guajataba. Allí utilizamos estaciones totales, colectoras de datos, sistemas GNSS-RTK, niveles ópticos, computadoras con AutoCAD y Carlson Civil, drones, entre otros. Nos faltó allí un nivel digital electrónico, pero como parte de las lecciones aprendidas, posteriormente adquirimos uno.





Figura 6: Instalación recomendada de puntos de control (Cortesía del autor)

CONCLUSION

Luego de haberles presentado este artículo el cual describe dos desastres naturales tenemos que concluir que la agrimensura y la topografía son un elemento crucial para poder lidiar con todo tipo de dificultades que nos podemos encontrar en este tipo de eventos. El levantamiento de datos para establecer posibles cambios en las estructuras estudiadas es esencial para la toma de decisiones y como proceder a atender los daños encontrados.

REFERENCIAS:

“LOS EFECTOS DEL SISMO EN LA INFRAESTRUCTURA GEODESICA DE PUERTO RICO, OCURRIDOS EN LA ZONA SUROESTE DE LA ISLA”, Publicado el 28 junio de 2020 por el Agrim. Hector M. Sanabria Valentín y el Ing. Top. Rigoberto A. Moreno Vázquez

<https://geocomunidad.wordpress.com/2020/06/28/los-efectos-del-sismo-en-la-infraestructura-geodesica-de-puerto-rico-ocurridos-en-la-zona-suroeste-de-la-isla/>

DJI Phantom 3 Professional Drone

<https://www.dji.com/support/product/phantom-3-pro>

Trimble GNSS Antennas

https://heavyindustry.trimble.com/en/products/gnss-antennas-construction?_gl=1*3unw60*_gcl_au*OTYyMTAyMDA2LjE3NTE1MDQ5NjM.

Leica Total Stations

<https://leica-geosystems.com/products/total-stations/multistation/leica-nova-ms60?redir=3>

Drones Made Easy

https://support.dronesmadeeasy.com/hc/en-us/categories/200739936-Map-Pilot-for-DJI?gad_source=1&gad_campaignid=259129813&gbraid=0AAA AADlQx6shXCRjbsrVGwBXicKafDq-g&gclid=CjwKC

[AjwsZPDBhBWEiwADuO6y3x8t7q090YlIPN_nRRU-DqmDMo9zvTPZgSNfHN6pJb4JgeXuHPCQRoCI3I-QAvD_BwE](https://www.dronesmadeeasy.com/hc/en-us/categories/200739936-Map-Pilot-for-DJI?gad_source=1&gad_campaignid=259129813&gbraid=0AAA AADlQx6shXCRjbsrVGwBXicKafDq-g&gclid=CjwKC)

Agisoft

https://www.agisoftmetashape.com/?gad_source=1&gad_campaignid=22447928281&gbraid=0AAAAADwoiSHKxq0HXFncKWFSHYfXfPu4O&gclid=CjwKCAjwsZPDBhBWEiwADuO6y2zjMTZ4pq0KhQJqd6v8sFzBKKPWITRAS-XFa_b1EQiXvmoVamfgehoCkQEQA_VD_BwE

Global Mapper

<https://www.bluemarblegeo.com/global-mapper-pro/>

Carlson Civil

<https://www.carlsonsw.com/product/civil-suite>

NGS NCAT

<https://www.ngs.noaa.gov/NCAT/>

HCLM Group

<https://www.hlcmgroup.com/>

RESEÑA

El Agrimensor Víctor M. Seda Figueroa nació en el barrio Ensenada de Guánica, Puerto Rico. Es presidente de la firma de agrimensores V. Seda & Associates, PSC., con oficinas en la ciudad de Mayagüez, Puerto Rico. En 1992 obtuvo su Bachillerato en Ciencias en Agrimensura y Topografía de la Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez. Es actualmente Primer vicepresidente de la Asociación Panamericana de Profesionales de la Agrimensura y Topografía (APPAT), con sede en San José, Costa Rica. Fue presidente del Instituto de Agrimensores, del Colegio de Ingenieros y Agrimensores de Puerto Rico. Ha dictado seminarios y conferencias en Puerto Rico, Costa Rica y República Dominicana.



BIOTECHNOLOGY ION EXCHANGE CHROMATOGRAPHY IMPROVEMENT

Miguel A. Nieves Ortiz

ABSTRACT

This research investigates the influence of different stop collection percentages on ion exchange chromatography in laboratory-scale separations. A direct association was seen between reduced stop collection (percentages of peak max) and increased chromatographic area under the curves, resulting in enhanced substance elution. Four (4) experimental runs showed linear behavior (97%, 95%, 93%, 90%, and 88% peak max). The presence of variability among runs serves to emphasize the susceptibility of outcomes, hence it is important to consider the control of key parameters such as chromatography process conditions and sample stability. The suggestions for future research include (1) adjusting column conditions and (2) investigating causes of variability to enhance reproducibility. This study offers significant contributions to the productivity of a blockbuster drug, by enhancing the uses of ion exchange chromatography. The supporting data was generated using a scaled-down model of the large-scale process operations.

Key Terms —Chromatography, Ion Exchange, Scale-Down Model, Stop Collection

INTRODUCTION

The Biotechnology Industry provides innovative protein-based therapeutics for diseases with limited to no treatment, receiving FDA support through a Fast Track program. These programs focus on regulatory tactics, faster approval processes, and innovative research and development methods to expedite the availability of medical goods to the public.

Several projects aim to accelerate the translation of scientific findings into medicinal goods, often overseeing the optimization of the manufacturing process. As a result, several opportunities and improvement projects arise once the commercialization of the medical product is established. The project presented in this document aims to improve an Ion Exchange Chromatography Process for a peptibody with microbial origin. This involves evaluating historical data, manufacturing process inputs and outputs, adverse chemical conditions, and equipment capabilities for process optimization. The project will be conducted in a process development laboratory using a scale-down model, providing a controlled environment for systematic experimentation, optimization, and quality assessment. The scale-down model is crucial in bridging the gap between conceptual optimizations and their practical implementation at commercial scale manufacturing processes. The main goal is to contribute to increased efficiency and productivity while maintaining product quality.

LITERATURE REVISION

Biotechnology is a multidisciplinary science that applies biological principles to develop new technologies for a variety of

purposes. It combines genetic engineering, molecular biology, bioinformatics, and medicines. Upstream processing is the initial cell/bacteria cultures to provide an ideal environment to produce desired biomolecules. Downstream processing is the separation, purification, and formulation of collected biomolecules into a final product. To isolate and purify the target biomolecule, this method uses a variety of unit operations such as filtrations and several chromatograph styles.

The development of this project considers the biopharmaceutical downstream purification process of drug substances with the technical knowledge of process development laboratories. The manufacture of a biopharmaceutical drug substance involves three stages: (1) acquiring/producing the initial ingredients, (2) conducting the upstream production of the biopharmaceutical, and (3) finalizing the downstream purification of the biopharmaceutical [1]. The downstream purification procedure eliminates or reduces impurities that are relevant to the product or the manufacturing process, as well as any product-related impurities that may be present in the biopharmaceutical-produced material.

The purification process downstream requires strict adherence to current Good Manufacturing Practices (cGMPs) and precise regulation of the validated process parameters. The stringent regulation of the initial manufacturing stages, known as critical process parameters (CPPs), is essential and demanding to ensure the reduction of different impurities in the refined biopharmaceutical drug substance. The downstream purification process for protein-based products (recombinant proteins and monoclonal antibodies) and gene therapy-based biopharmaceuticals (viral vectors and genetically modified patient cells, mRNA non-viral vector) must meet strict expectations and significant requirements set by regulatory authorities [1].

Typically, the purification process for recombinant proteins and monoclonal antibodies involves taking the harvested material from the bioreactor, which has been clarified, and passing the solution containing the biopharmaceutical through a specific sequence of chromatographic and filtration steps. The order in which these steps are performed is crucial for achieving the desired level of purification. In our project, we will be improving an Ion Exchange Chromatography (IEC) process. IEC employs a method of segregating proteins based on their charged residues. Charged residues on protein surfaces include the side chains of amino acids, the α -amino and α -carboxyl termini of the chains, and the sialic acid residues on glycoproteins [1]. The residues possess amphoteric properties, hence causing the sign and overall charge of proteins to be dependent on the pH level and electric potential of the product media. The isoelectric point (pI) of a protein is the

pH at which its positive charge is equal to its negative charge. A protein forms a bond with an anion exchanger, which is a resin that carries a negative charge when the pH is higher than its isoelectric point (pI). A protein forms a complex with a cation exchanger, which is a resin that carries a positive charge when the pH is lower than its isoelectric point (pI).

To create a purification process that is both reliable and consistent in producing a product of satisfactory quality, the fundamental aspects of each chromatography phase in the plan are evaluated via small-scale trials [2]. When developing a purification process at a scale-down model, it is crucial to consider the anticipated end size of the process. This allows for a comprehensive evaluation of challenges related to scaling up the process. This is especially crucial if the protein must be purified following the regulations of current good manufacturing practices, as established by regulatory agencies. In a standard downstream process, chromatography is often divided into three separate phases: capture, intermediate purification, and final polishing [2]. Each step needs a distinct emphasis, and as the purification process is expanded, new obstacles will arise.

After conducting preliminary small-scale scouting tests, the purification process will usually could generate protein amounts in the range of milligrams. The primary outcome of these process optimization initiatives is the thorough consideration and, where feasible, the definition of product information and process parameters. The process of scaling up from laboratory to pilot plant often requires multiplying the size by a factor of 50 to 100 [2]. When scaling up chromatography, it is important to carefully evaluate many elements relating to chromatography, non-chromatography, and equipment. These factors together contribute to the effective process scale-up.

To obtain a larger scale of chromatographic purification, it is common to raise the diameter of the column and the rate at which the liquid flows through it. However, it is important to keep the height of the media bed and the speed at which the liquid flows through the column constant. Successful scale-up may be achieved by increasing the column diameter while maintaining a proportional increase in the column cross-sectional area with the process volume while keeping the media bed height constant. This is because the total duration that the target molecule spends in the process, from small-scale development to large-scale columns, stays unchanged. Theoretically, the separations should be almost the same for both column diameters, thus serving as the foundation for a successful scale-up. Nevertheless, when the size of the column grows, additional considerations arise, including the selection and preparation of buffers, the arrangement of the media, the design of the column, and the maintenance of cleanliness in the manufacturing process.

Most of the recombinant proteins are synthesized by utilizing mammalian (Chinese Hamster Ovary cells) and microbial expression methods (*Escherichia coli* and *Saccharomyces cerevisiae*). Mammalian post-translational modifications are often necessary for precise interactions with target molecules in systems, whereas microbial expression methods are favored for achieving larger quantities of expression. Utilizing *E. coli* as

biological platforms for the regulated manufacture of polypeptides via recombinant technology is a cost-effective approach [3]. The whole procedure might be executed by using microbial cell factories with comparatively simple approaches and instruments. Furthermore, the creation of proteins outside the cell facilitates the process of purification that follows.

Therapeutic proteins and peptides provide several benefits, with the most significant being their ability to give effectiveness, selectivity, and specificity compared to tiny chemical compounds [3]. Protein and peptide treatments are largely safe due to their composition, whether modified or artificially produced. Proteins and peptides are considered safe for use in living organisms and are not considered alien to their systems. Peptides operate as hormones, chemokines, and cytokines, playing a crucial role in transmitting signals throughout living organisms. Owing to the aforementioned factors, the potential for unexpected adverse reactions is unpredictable when it comes to peptide medications. Indeed, it has been noted that the adverse effects associated with peptide medicines are often caused by either incorrect doses or local responses at the injection sites [3].

Therapeutic proteins and peptides have a strong affinity for certain targets. This refers to the minimum or complete lack of non-specific binding to unwanted targets, resulting in a high therapeutic index. For instance, therapeutic proteins with low molecular weight, such as monoclonal antibodies and hormones, exhibit a high degree of specificity in binding to their target receptors, even at very low concentrations of picomolar magnitude [3].

Ion-exchange chromatography (IEX) is a well-established method often used to thoroughly analyze therapeutic proteins. Before release or process improvements, it is necessary to conduct a comprehensive investigation on the identity, heterogeneity, impurity content, and activity of every new batch of therapeutic proteins. This examination employs a diverse array of analytical techniques, such as reversed-phase liquid chromatography (RPLC), hydrophobic interaction chromatography (HIC), and/or size exclusion chromatography (SEC). Cation-exchange chromatography (CEX) is the predominant form of IEX employed for protein purification and characterization. CEX is acknowledged as the gold standard for charge-sensitive analysis, although technique parameters, such as column type, mobile phase pH, and salt concentration gradient, typically need to be tuned for each specific protein [4]. Presently, IEX employs two methodologies, namely salt-gradient and pH-gradient, each with its own merits and limitations. Currently, the primary constraint of the pH-gradient ion exchange (IEX) technique is the exorbitant expense associated with commercial buffers, hence impeding the broader use of this method. A recommended approach for developing methods including therapeutic proteins is to use a polymeric non-porous stationary phase that is linked with a strong cation exchanger containing sulfonic acid groups. To determine the optimal mobile phase parameters, such as pH, salt type, and concentration, it is crucial to consider the isoelectric point (pI) of the proteins. So far, IEX has effectively been

used to analyze many types of modifications on peptide chains, such as deamidation, C-terminal lysine truncation, N-terminal pyroglutamate, methionine oxidation, or glycosylation variations, in various therapeutic proteins, including monoclonal antibodies (mAbs) and antibody-drug conjugates (ADCs) [4].

Hanke and Ottens investigated the vital significance of liquid chromatography in biopharmaceutical purification, recognizing it as an essential step in most purification methods. The research underlines the need for novel, logical, methodical, and generally applicable process development methodologies to solve the bottlenecks often associated with biopharmaceutical production [5]. The authors emphasize that, despite the widespread use of liquid chromatography, its knowledge is not properly used in process development. The study provides an overview of recent achievements in detecting and quantifying the features and interactions involved in downstream process evolution. The emphasis is on the mixture's composition, solute molecular characteristics, and interactions with resins. The Quality by Design (QbD) and Process Analytical Technology (PAT) efforts emphasize the need to improve process and product knowledge.

The purification difficulty in biopharmaceuticals is described by the complicated cascade of unit activities necessary to reach high levels of product purity. The downstream process developer confronts issues due to slight differences in the upstream process and the reliance on single-unit operations. High-throughput process development (HTPD) and the transition from trial-and-error methodologies to more mechanistic models. Mechanistic models based on basic principles provide a greater degree of process knowledge, bridging the gap between early-stage design decisions and advanced-stage optimization [5]. All these factors are required to have a great representation of a scaled-down model.

PROBLEM STATEMENT

This research consists of optimizing the chromatography process step for a microbial-derived peptide, with the primary goals of boosting step yield, with a potential recovering an additional 2 to 4 grams of product, keeping excellent quality, and guaranteeing regulatory compliance. This will be achieved using engineering knowledge and a scientific approach by conducting scale-down model experiments of Ion Exchange Chromatography to provide consistent evidence of the optimization. Scale-down models serve as a manufacturing representation of the process in which various scenarios can be tested as part of continuous improvements of manufacturing processes.

This work is significant because it has the potential to transform biotechnological manufacturing systems. The research intends to boost overall production productivity, minimize waste, and strengthen the supply chain by improving chromatography efficiency and yield. This not only improves the plant's capacity to produce additional goods, but it also corresponds with sustainability goals by limiting environmental effects. Furthermore, the emphasis on product quality and regulatory compliance emphasizes the company's dedication

to providing safe and effective remedies. In essence, this study addresses major issues in biopharmaceutical production, resulting in significant breakthroughs that can lead to improved patient outcomes, a more robust supply chain, and a more sustainable biotechnology business.

RESEARCH OBJECTIVES

The key goals of this research project are to improve the chromatography process to produce a microbial-derived peptide, to achieve a higher step yield, and to recover an extra 2 to 4 grams of the target product. This increase represents a step yield increase of 3.39% to 6.78%. The initiative aims to preserve and even improve product quality while complying with tight regulatory criteria through thorough design and refining. The main purpose of improving these essential factors is to contribute to a more efficient and sustainable manufacturing process by increasing protein recovery by 2.74%. Finally, the project aims to provide a significant advancement in biotechnological production, ensuring increased product output, and regulatory compliance, thereby providing a valuable contribution to both the scientific community and the biopharmaceutical industry.

RESEARCH CONTRIBUTIONS

The main contribution to the development of this research is to create value for patients ensuring more products are manufactured. This will be achieved by optimizing an ion exchange chromatography process, resulting in improved efficiency and yield during the separation and purification process. This will directly contribute to higher step yields (increase of 3.39% to 6.78%) and greater grams (increase of 2 to 4 grams) of the target product recovered. The contribution will be developed in a Process Development lab conducting Scientific Experiments scale-down model contributions that will set the reference for the posterior laboratory runs of the process. This laboratory scale optimization will be translated to the production process, ensuring that excellent product quality is maintained. The optimization of the process and increased plant capabilities to produce additional goods, as well as the potential decrease in 1 to 2 lots manufactured every year, indicates a commitment to a more sustainable and flexible manufacturing environment. Furthermore, the enhanced supply chain guarantees that patients have constant and timely product availability. This research project blends biotechnology developments with a focus on sustainability and productivity, providing a comprehensive solution that benefits patients, the manufacturing process, and the industry.

METHODOLOGY

This research project investigates the variation of the stop-collect parameter in chromatography processes using an experimental approach. It simulates large-scale outcomes using industry laboratories and bench-scale columns. The study aims to examine the effects of decreasing the stop-collect percentage on grams recovered. The results will provide insights for larger-scale process improvements, ensuring safety and adherence to protocols.

RESEARCH DESIGN

This Research will have an experimental approach to conduct a prospective study. This project will be done using Industry Laboratories in which a scale-down model the Chromatography will be used to simulate Large-scale results of the variation of the stop-collect parameter of the process. To experiment bench-scale columns with the required resin will be packed, buffers for the process will be prepared, the Chromatograph System method will be created, and four experimental runs will be conducted to evaluate various scenarios. To run the experiments the equipment that will be used is a Modular Chromatography System. The variation of the Stop Collect will be conducted at the values of 95%, 93%, 90%, and 88% peak max (PM). Data analysis will be conducted to evaluate the difference in terms of yield and grams of collecting beyond 97% PM. Since the chromatograph provides the whole peak, for each run the area in 97%, 95%, 93%, 90%, and 88% PM will be evaluated. This experiment will have Controlled Variables in which the temperatures, pressure, experimental buffers, and columns will remain the same to reduce variability.

HYPOTHESIS

As the Stop Collect Percentage of Maximum Peak is lowered, more grams will be retrieved.

EXPERIMENTAL VARIABLES

For this experiment, the independent variables will be the Start Collect, the Stop Collect, the Peak Max, and process Flow Rates. The dependent variables of this experiment will be the Volume, Concentration of the Pool, Grams of Product, and Step Yield.

DATA COLLECTION

Every experimental run data will be collected in the Modular Chromatography System and the data will be exported to an Excel file. CSV file will be used for data processing and statistical analysis. Data acquired from each chromatography run will be the volume, UV signal, Conductivity, and pressure of each phase of the run. We will be evaluating the Elution phase of the run in which the chromatograph peak appears. The concentration of the pool will be determined using lab equipment and that data will be used to determine the grams acquired at each standpoint. All the data will be stored in an Excel file and will be analyzed using Minitab software to provide all statistical information. Statistical P-value using a confidence interval of 95% will be used to determine statistical significance. Also, a graph of each chromatograph will be presented to analyze the difference between each run.

SAFETY MEASURES

Experiments will be conducted in an industry-qualified laboratory, using Personal Protection Equipment such as safety glasses, gloves, and Lab Coats. A laminar flow bench will be used to prevent contamination of the biological samples and to handle chemicals. Also, the Safety Data Sheet will be evaluated before any experimentation.

LIMITATIONS OF THIS RESEARCH DESIGN

An experimental run will be conducted with the available product pool for the corresponding chromatography. This research will provide data at a laboratory scale for the feasibility of an improvement on a Manufacturing Scale, but the process and requirements of a manufacturing implementation are out of the scope of this research. All the experiments will be equivalent to the expected inputs and outputs of the manufacturing process and will serve as a guide for the modifications required before implementation.

RESULTS DISCUSSION

A summary of the results of the experimental runs is provided in Table 1. The complex nature of ion exchange chromatography is highlighted by the variation in grams and volume across various stop collection percentages within each run. Subtle oscillations can be seen when analyzing the means of grams and volume collected at different stop-collection percentages. This suggests that column qualities, among other things, have a big impact on the reproducibility of data. These discrepancies could be the result of things like inconsistent packing, possible contaminants in the sample, or deterioration of the column over time. Because of how susceptible the chromatographic process is to these changes; it is crucial to keep column conditions constant to guarantee accurate and repeatable results. Any change in column characteristics might affect elution patterns, which in turn affects mass yield and volume because the separation process is largely dependent on the interactions between the analyte and stationary phase. Therefore, attaining dependable and repeatable ion exchange chromatography findings requires close attention to column maintenance and quality control.

Table 1 Experimental Run Results Summary

Run	Volume Collected (mL)	Concentration (mg/mL)	Grams (mg)
Run 1 95% PM	26.68	1.2789	34.12
Run 2 93% PM	25.27	1.2408	31.35
Run 3 90% PM	25.89	1.2242	31.69
Run 4 88% PM	25.57	1.2590	32.20

In Figure 1, we can see the elution profiles for each run. The observed variability is reflective of the dynamic nature of chromatographic separations, where factors like column packing consistency, sample impurities, or minor variations in operating conditions can contribute to fluctuations in the elution profiles. Understanding and measuring this fluctuation is essential for interpreting outcomes and refining chromatographic procedures. Extensive research on the variables causing variability, such as thorough evaluations of sample purity and column conditions, can provide valuable information for improving the repeatability of ion exchange chromatography results. Through the identification and mitigation of these

causes of variability, scientists can enhance their methodology and attain chromatographic analysis results that are more consistent and dependable.

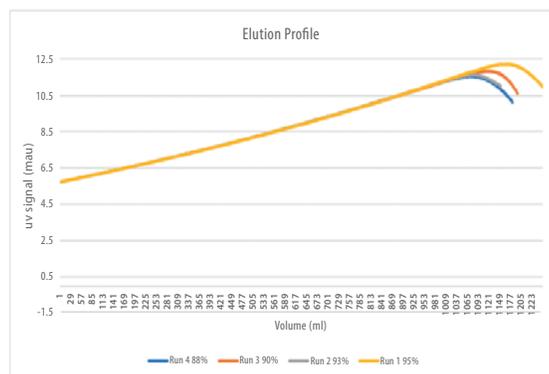


Figure 1 Runs Elution Profile

An examination of the chromatographic data reveals a distinct impact of reducing the stop collection percentage on the area under the chromatographic peaks, as depicted in Table 2. The area, represented in mL*mAU, serves as a quantitative measure of the eluted substance, reflecting the extent of the chromatographic separation. Notably, as the stop collection percentage decreases, there is a corresponding increase in the area under the peaks. This observation is particularly evident in Run 4, where the area at 88% PM stop collection is 10,299, whereas if the collection was halted at 97% PM, only 9,731 mL*mAU would have been collected. The direct correlation between stop collection percentage and area signifies that a reduction in the percentage of stop collection results in a larger area, indicating a more extensive elution of the target substance. Consequently, this expanded area directly contributes to a greater mass yield. In essence, on average, diminishing the stop collection percentage manifests as an effective strategy for enhancing the collection of grams, affirming the crucial role of stop collection optimization in ion exchange chromatography.

Table 2 Experimental Area Comparison for Each Run

Stop Collect (%) PM	Run 1 95% Areas (mL*mAU)	Run 2 93% Areas (mL*mAU)	Run 3 90% Areas (mL*mAU)	Run 4 88% Areas (mL*mAU)
97	10842	9782	10163	9731
95	11005	9982	10276	9908
93	11143	10157	10376	10027
90	11322	10401	10495	10207
88	11441	10566	10569	10299

We can see this trend in Figure 2, in which the area is at its highest at 88% PM stop collect and lowest at 97% PM:

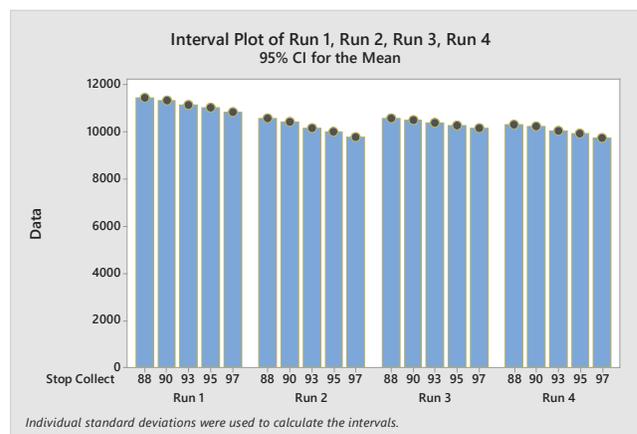


Figure 2 Interval Plot for Area (mL*mAU) per Run

One-way ANOVA was used with a 95% Confidence Interval to determine if there was a statistically significant difference between the areas of each run. This provides information on the variability present from each run. The P-value was 0 and the F-value was 21.04. With this information, we can reject the null hypothesis and conclude that at least one mean is different from the rest. In Figure 3, we can see the variation from the means of all runs.

Overall, the product quality review appears to have gone well, as all runs passed most of the tests, including the CEX-HPLC, SE-HPLC, RE-HPLC, and ECP Elisa tests, refer to Table 3. This continuous success using several analytical techniques points to the eluted materials from Runs 1, 2, and 3 having a high level of purity and conformance. The dependability of these findings supports both the general caliber of the samples that were gathered and the strength of the chromatographic separation procedure.

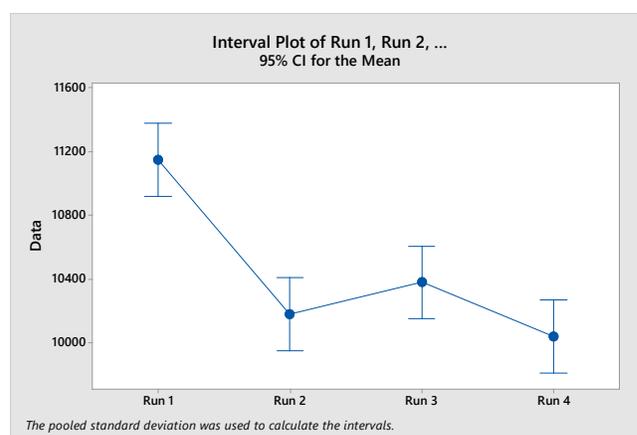


Figure 3 Interval Plot for Mean per Run

Nonetheless, it is important to pay attention to the fact that Run 4 failed the CEX- and RE-HPLC tests. The failures in these tests, about reverse-phase and cation-exchange chromatography, may point to the existence of contaminants or fluctuations in the composition of the substance that was

eluted in Run 4. Understanding the causes of these failures is essential to identify possible problems with the chromatographic procedure or sample preparation related to Run 4.

Variations in column conditions, sample deterioration, or problems with the elution procedure could all be contributing factors to these failures. The differences between the RE-HPLC and CEX-HPLC tests may be explained by more research into the chromatographic factors unique to Run 4, such as the makeup of the mobile phase and column integrity.

Table 3 Product Quality Results Summary

Run	RE-HPLC	CEX-HPLC	SE-HPLC	ECP Elisa
Run 1 95%	Pass	Pass	Pass	Pass
Run 2 93%	Pass	Pass	Pass	Pass
Run 3 90%	Pass	Pass	Pass	Pass
Run 4 88%	Fail	Fail	Pass	Pass

CONCLUSION

The study on ion exchange chromatography experiments has revealed the complex mechanisms involved in the separation procedure. The optimization of the stop collection percentage is crucial for maximizing volume and mass yield, with a 95% rate being the most effective. The efficiency of this method in boosting drug elution is attributed to the direct association between lower stop-collection percentages and the increased area beneath chromatographic peaks. The heterogeneity in the region of collection across different percentages of stop collection within each run highlights the susceptibility of ion exchange chromatography to subtle alterations in experimental parameters. The presence of variability in chromatographic procedures requires careful consideration of essential parameters, including column conditions and sample purity, to improve reproducibility.

Positive findings were obtained for Runs 1, 2, and 3 of the product quality assessments, including RE-HPLC, CEX-HPLC, SE-HPLC, and ECP Elisa testing. However, the lack of success in Run 4 during the RE-HPLC and CEX-HPLC tests suggests potential problems unique to this particular run. Further research on column conditions and sample integrity are necessary.

The research enhances the understanding of the chromatographic procedure and optimization ideas but also emphasizes the importance of careful consideration of experimental parameters for reproducibility and dependability. Future studies should focus on expanding stop collection percentages and systematically investigating sources of variability and how to mitigate them, to improve methodologies and promote consistent and reliable ion exchange chromatography outcomes.

REFERENCES

Geigert, J., "Downstream Purification of the Biopharmaceutical Drug Substance," In *The Challenge of CMC Regulatory Compliance for Biopharmaceuticals*. Springer, Cham, 271-297, June 2023. [Online] Available: doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-31909-9_8.

Milne, J. J., "Scale-Up of Protein Purification: Downstream Processing Issues," In Loughran, S.T., Milne, J.J. (eds) *Protein Chromatography. Methods in Molecular Biology*, vol 2699. Humana, New York, NY, 2(1), 61-75, October 2016. [Online]. Available: doi: https://doi.org/10.1007/978-1-0716-3362-5_5.

Agyei, D., et al, "Protein and Peptide Biopharmaceuticals: An Overview," *Protein & Peptide Letters*, Vol. 24 (2), 94-101, BSP, February 2017. [Online] Available: <https://www.ingenta-connect.com/content/ben/ppl/2017/00000024/00000002/art00004>.

Fekete, S., et al, "Ion-exchange chromatography for the characterization of biopharmaceuticals," *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, Vol. 113, 43-55, September 10, 2015. [Online] Available: doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2015.02.037>.

Hanke, A. T., & Ottens, M, "Purifying biopharmaceuticals: knowledge-based chromatographic process development." *Trends in biotechnology*, Vol. 32 (4), 210-220, March 11, 2014. [Online] Available: [https://www.cell.com/trends/biotechnology/fulltext/S0167-7799\(14\)00019-5](https://www.cell.com/trends/biotechnology/fulltext/S0167-7799(14)00019-5).

RESEÑA

Miguel A. Nieves Ortiz posee un bachillerato en Ingeniería Biomédica y una maestría en Ingeniería de Manufactura, ambos otorgados por la Universidad Politécnica de Puerto Rico. Ha liderado proyectos de mejora continua, automatización y digitalización en la industria biofarmacéutica, aplicando metodologías Lean y Six Sigma. Su enfoque integra calidad, procesos y tecnología para lograr excelencia operativa. Además, es colaborador del Instituto de Ingenieros Industriales del CIAPR compartiendo experiencias de trabajo y temas de interés para la matrícula, así como, planificando los próximos pasos para su profesionalización.



RETOS Y OPORTUNIDADES DE LA EDIFICACIÓN SOSTENIBLE UTILIZANDO LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Ing. Guillermo Casar Marcos

ABSTRACTO

La industrialización ha traído consigo retos ambientales significativos, como la contaminación del aire, del agua y del suelo, la sobreexplotación de recursos y la pérdida de biodiversidad. Estos desafíos son resultado de prácticas industriales insostenibles y la falta de regulaciones efectivas, en donde la Inteligencia Artificial es una opción de solución. La inteligencia artificial, junto con la edificación sostenible y las Certificaciones Internacionales, ayudan a crear Edificaciones y Ciudades Sostenibles aplicando correctamente las normas Mexicanas, así como las normas internacionales. La utilización de la inteligencia artificial en la ingeniería Panamericana, resuelve retos: como es conseguir materiales y esquemas de fabricación innovadores, nuevas fuentes energéticas, tecnologías de batería, entre otras. Las oportunidades que se dan con el empleo de la inteligencia artificial, ayudan al aprendizaje activo de las Ciencias, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas, entre otras. Existe un nicho de mercado mejorando normas y estándares de sostenibilidad en el corto, mediano y largo plazo, reforzadas con incentivos gubernamentales. La normatividad tiene que ser diseñada en base a objetivos, no tecnologías, a fin de favorecer la innovación e investigación. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS son el plan maestro para conseguir un futuro sostenible para todos, para lograr frenar el calentamiento del Planeta y el cambio climático.

INTRODUCCIÓN

La industrialización ha traído consigo retos ambientales significativos, como la contaminación del aire, del agua y del suelo, la sobreexplotación de recursos y la pérdida de biodiversidad. Estos desafíos son resultado de prácticas industriales insostenibles y la falta de regulaciones efectivas, en donde la Inteligencia Artificial es una opción de solución. [1.1-1.8 y 2.1-2.5].

ANTECEDENTES

La Dra. Gro Harlem Brundtland en 1987, complementó la definición de Sostenibilidad, que hasta ese momento estaba conformada por la triada Medio Ambiente, Sociedad y Economía, que definía el concepto, con el reporte denominado “Nuestro Futuro Común”, publicado por la Dra. Brundtland, en la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo, también conocida como Comisión Brundtland. En este documento se identifican los elementos de la interrelación entre ambiente y desarrollo, y define que “el Desarrollo Sustentable es aquel que puede lograr satisfacer las necesidades y las aspiraciones del presente, sin

comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades y aspiraciones”. A inicios de la década de los años noventa del siglo XX, el Reino Unido implemento formalmente la que es considerada una de las primeras certificaciones, enfocada a la Edificación Sustentable, BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method / Método de evaluación ambiental del establecimiento de investigación de edificios) para las construcciones nuevas, así como las existentes. En los noventas se incrementaron notoriamente los cambios climáticos sobre todo en países cercanos a los Polos, como fueron Australia y Canadá que con el apoyo de la Reino Unido, junto con lo descubierto en el Premio Nobel de Química 1995 por el Dr. Mario Molina, de México, Paul J. Crutzen de los Países Bajos, y Frank Sherwood Rowland de Estados Unidos, “por su trabajo en química atmosférica, y particularmente en lo concerniente a la formación y la descomposición del ozono”, se descubrieron los gases efecto invernadero, que más afectaban al adelgazamiento de la capa de ozono, en la estratosfera terrestre que contiene una concentración relativamente alta de ozono. Lo cual provoca el calentamiento del Planeta y un acelerado cambio climático, en donde una de las industrias que más afecta, es la industria de la Construcción, por lo anterior se elaboró un cuestionario para aplicarlo a la Construcción, que llamaron GB-Tool (Green Building Tool / Herramienta de Construcción Ecológica), dándose a conocer en la reunión Internacional de Maastricht Holanda en 2000 y en Oslo Noruega del 2002 se internacionaliza, invitando a los países interesados a utilizar la GB-Tool en sus países, adaptándolo a sus condiciones bioclimáticas y propiciar crear sus propias certificaciones, tomando como base la certificación BREEAM del Reino Unido y la internacional GB-Tool, provocando la creación de “World Green Building Council” (Consejo Mundial de la Construcción Ecológica), que al paso de los años en los diferentes continentes se extendió, dando origen a sucursales del World GBC y a la vez estableciendo sus propias certificaciones, como Green Star en Australia, LEED (Leadership in Energy and Environmental Design / Sistema de “Liderazgo en Diseño Energético y Medioambiental”) en USA, DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen / German Sustainable Building Council / Consejo Alemán de Construcción Sostenible) en Alemania, HQE (Haute Qualité Environnementale / Únete al movimiento para la acción y calidad de la vida) en Francia, CASBEE (Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency / Sistema Integral de Evaluación de la Eficiencia Ambiental de los Edificios) en Japón, Living

Building Challenge en USA, EDGE IFC WBG (Excellence in Design for Greater Efficiencies – International Finance Corporation – World Bank Group) entre otras certificaciones mundiales. La Comisión para la Cooperación Ambiental, Canadá-México-USA entre 2005 y 2008, elaboró el informe “Retos y Oportunidades de la Edificación Sustentable en América del Norte”, el cual apuntaló el concepto sobre todo en Norteamérica. En México a partir de 1994 se establece por el Instituto Mexicano del Edificio Inteligente (IMEI), el Premio Nacional al Edificio Inteligente del IMEI y por otro lado en aquellos años, la normativa Mexicana se destacó, elaborando en los noventa, varias normas sobre eficiencia energética como fueron la NOM-007-ENER-2004 en sistemas de alumbrado de edificios, NOM-008-ENER-2001 junto con la NOM-020-ENER-2011 sobre la optimización de las envolventes en edificios, respondiendo a la bioclimática, entre otras, destacando la norma Mexicana NMX-AA-164-SCFI-2013 de Edificación Sustentable, la cual ha dado origen a toda una estrategia de futuras normas y/o estándares en México, que al día de hoy, ya están en vigencia, entre las que destacan son la NMX-J-C-I-489-ANCE-ONNCCE-NYCE-2014 de Centro de Datos de Alto Desempeño, la NMX-C-506-ONNCCE-2015 de Procesos de Comisionamiento (Commissioning Cx), la NMX-C-527-1-ONNCCE-2017 Modelado de Información para la Construcción MIC (conceptos de Modelaje BIM), entre otras. La participación de México y el Mundo en los comités espejo de las normas internacionales ISO, ha sido destacada y como ejemplo son los comités ISO-TC-205 de Edificación Sustentable, entre otras. Las certificaciones, estándares y normas internacionales son buenas referencias para la industria de la Construcción en los países Panamericanos, pero por la diversidad climática, en muchos casos no son aplicables y se convierten en adaptaciones caras y poco prácticas. Hay que desarrollar normas en Puerto Rico, México, países Panamericanos y el Mundo, debido a que son referencias técnicas, para dar elementos legales a nuestros Reglamentos y Leyes. [1.8-1.21].

OBJETIVO

El objetivo es hacer un análisis completo de las bases de los conceptos de las Edificaciones Sostenibles, las cuales parten de las certificaciones nacionales e internacionales que al paso de los años han provocado su implantación y uso en los diferentes países, así como las normas y/o estándares nacionales e internacionales como son las ISO, así como otros instrumentos normativos, que han regulado a la Industria de la Construcción de las Edificaciones Sostenibles y el resultado concreto es hacer una propuesta de continuidad de estas normas y/o estándares en Puerto Rico, México, países Panamericanos y el Mundo, las cuales se consideran referencias técnicas, para que apoyen a los Reglamentos y Leyes, en estos temas interdisciplinarios y todo ello repercute positivamente o negativamente en el diseño, construcción y operación de las Edificaciones y/o Ciudades Sostenibles. A medida que los Gobiernos sigan apoyando más a estos

esfuerzos de la regulación en la Edificación Inteligente y/o Edificación Sostenible, se vean beneficiados los desarrolladores e inversionistas con el otorgamiento de estímulos fiscales y de otro tipo. Todo lo anterior tendrá más éxito a medida que los usos y costumbres se utilicen con más regularidad en la Industria de la Construcción y en las Ciudades Sostenibles en Puerto Rico, México, países Panamericanos y el Mundo. [1.1-1.8].

CONTENIDO

Hay que desarrollar un análisis de las certificaciones y normas nacionales e internacionales, para lograr mejorar las existentes en Puerto Rico, México y los demás países Panamericanos e inclusive las mejores para proponerlas a nivel Internacional, algunas de ellas. Dicho alcance iniciará con los orígenes, estableciendo el concepto de “Desarrollo Sostenible”, buscando una Economía mediante el análisis y deterioro ambiental. También se analizarán los recursos y sus aplicaciones en las actuales certificaciones nacionales e internacionales. Considerando desde la definición del concepto de Net Zero, hasta su análisis práctico, como son las emisiones netas de energía cero (Net Zero), Costo Net Zero, Net fuera del sitio a cero el consumo de energía, Fuera de la conexión a la red, Diseño y construcción, Energía de la cosecha, La “cosecha de energía” frente a “la conservación de energía” y el comportamiento de los ocupantes. Los esfuerzos de desarrollo de Net Zero, nos dan buenos resultados como son la aplicación del Net zero en edificios de bajo consumo, para encontrar sus ventajas y desventajas. Cerrando con el análisis de la normatividad internacional ISO, así como las Américas y el Mundo pueden aportar a ella, mediante su base normativa, como referencias técnicas de los Reglamentos o Estándares y de las Leyes, de la Edificación Sostenible, en favor de la mitigación del cambio climático y del calentamiento del Planeta, originado de forma directa o indirecta por la Industria de la Construcción, con una impacto directo en la Ciudades, en las que debemos tomar medidas de mitigación en su diseño, construcción y operación, para poder llamarlas Ciudades Sostenibles. [1.6; 1.11].

En los últimos tiempos pareciera que está de moda el tema “ecológico” en todos los ámbitos en Puerto Rico, México, países Panamericanos y el Mundo, y principalmente en la política. Esto es lamentable, ya que cada vez que se habla de ecología es en la medida en que el deterioro del medio ambiente se hace patente y más cercano a los intereses sociales y personales, afectando directamente uno de los derechos humanos elementales para la supervivencia: El Derecho a un Medio Ambiente Saludable. [1.8-1.15].

Los problemas generados en el medio ambiente por la contaminación del aire, del agua, la deforestación y el uso indiscriminado de los recursos naturales, entre otras cuestiones, no son exclusivos de una nación determinada. Atañen a la colectividad y, por lo tanto, no son ajenos a ningún individuo porque, dada su naturaleza, suelen trascender los límites geográficos y temporales, deteriorando aceleradamente nuestro entorno, que lo llamamos Planeta Tierra, que finalmente, no es patrimonio sólo de la presente generación. [1.8-1.15].

Para alcanzar el derecho a la salud ambiental se requiere de una sociedad que encuentre en la convivencia armónica con su medio ambiente, el motivo primario para su conservación y optimización. No obstante lo anterior, la realidad nos enfrenta a un sistema de vida y modelo de mercado que ha puesto el interés económico por encima de cualquier otro, incluso del alto interés de proteger nuestro planeta. [1.8-1.15].

A partir de la divulgación del concepto de desarrollo sustentable en el Informe Brundtland en 1987, se despertaron grandes expectativas sobre sus alcances, aunque también complejas controversias en relación con sus dimensiones y, sobre todo, con sus posibilidades de instrumentación en un marco internacional caracterizado por marcadas asimetrías y tendencias de la globalización. [1.8-1.15].

En la COP 2015 en París, Francia, todos los Estados Miembros de las Naciones Unidas aprobaron 17 Objetivos

del Desarrollo Sostenible (ODS) como parte de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, en la cual se establece un plan para cumplir con los ODS en 15 años. En la cual Naciones Unidas presenta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, que son medidas audaces y transformativas que se necesitan urgentemente para reconducir al mundo por el camino de la sostenibilidad y la resiliencia. Estableciendo los 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) y 169 metas de carácter integrado e indivisible, de alcance mundial y aplicación universal, y conjugan las tres dimensiones del desarrollo sostenible: la económica, la social y la ambiental, de forma equilibrada e integrada. [1.16-1.21].

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. [1.16-1.21].



En la ODS 13 (Acción por el Clima), menciona que con el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, el cambio climático evoluciona a un ritmo mucho más rápido de lo previsto. Sus efectos pueden provocar fenómenos meteorológicos extremos y cambiantes, así como la elevación del nivel del mar. [1.16-1.21].

Para mitigarlo el calentamiento global es necesario no superar un aumento de la temperatura promedio del Planeta de más de 1,5 °C para el 2030, por encima de los niveles preindustriales, las emisiones de los gases efecto invernadero (GEI), que necesitan reducirse aproximadamente a la mitad para 2030, que estamos muy lejos de lograr este objetivo. [1.16-1.21].

Hay que avanzar hacia un desarrollo resiliente al clima, al tiempo que se traza una trayectoria clara para lograr cero emisiones netas. El tiempo se acaba y es necesario tomar medidas para evitar consecuencias catastróficas y garantizar un futuro sostenible para las generaciones venideras. [1.16-1.21].

La Inteligencia Artificial en el desarrollo sostenible se presenta como una alternativa de solución a los modelos que han propiciado la degradación del ambiente, a partir de la búsqueda de respuestas para corregir las fallas y evitar futuros problemas; si bien enfrenta dificultades derivadas de su aplicación a muy complejos contextos regionales que exigen soluciones específicas. Estas diferencias regionales no pueden ser abordadas con estrategias uniformes, que volverían a ofrecer falsas expectativas que, en plazos cada vez más cortos, se revierten frenando los esfuerzos y dando lugar a justificadas resistencias de la gente para participar en los proyectos institucionales. [2.1-2.15]

Las posibilidades de transitar al desarrollo sostenible se encuentran arraigadas en la puesta en marcha de una política verdaderamente participativa, en la que cada sector, grupo e individuo de la sociedad puede asumir su responsabilidad particular y actuar en consecuencia. En este

propósito la educación, la capacitación y la comunicación cumplen funciones de primer orden. [2.15-2.25]

CONTROL AUTOMÁTICO EN LA INGENIERÍA

La ingeniería de control es la disciplina de la ingeniería que aplica la teoría de control para diseñar, planificar y desarrollar dispositivos y sistemas con comportamientos deseados. La práctica requiere utilización de sensores y actuadores de entrada para hacer modificaciones en la respuesta de salida. La ingeniería de control se enfoca principalmente en la implementación de sistemas de control a partir de modelados matemáticos. [3.1-3.05]

Se ocupa desde sus orígenes de la automatización y del control automático de sistemas industriales, sin intervención humana directa. Campos como el control de procesos, control de sistemas electromecánicos, supervisión y ajuste de controladores y otros donde se aplican teorías y técnicas entre las que podemos destacar el Control óptimo, control predictivo, control robusto y control no lineal entre otros, todo ello con trabajos y aplicaciones muy diversas (investigación básica, investigación aplicada, militares, industriales, comerciales, etc.), las cuales han hecho de la ingeniería de control una materia científica y tecnológica imprescindible hoy en día, destacando la Inteligencia Artificial como un gran apoyo para poder lograrlo. [3.05-3.10]

ÁREAS DEL CONTROL AUTOMÁTICO EN LA INGENIERÍA

La ingeniería automática es un área multidisciplinar que se encarga de la concepción y desarrollo de autómatas, máquinas industriales y de otros procesos automáticos. [3.05-3.10]

ROBÓTICA EN SISTEMAS DIGITALES

La robótica es la disciplina que se ocupa del diseño, operación, manufacturación, estudio y aplicación de autómatas o robots. Combina áreas como la ingeniería mecánica, eléctrica, electrónica, biomédica y las ciencias de la computación para crear herramientas que puedan realizar tareas de manera eficiente, rápida y en ambientes inaccesibles para los humanos. [4.1-4.15]

La robótica combina diversas disciplinas como la informática, la inteligencia artificial, la ingeniería de control y la física. Algunas aplicaciones son: Ingeniería en automatización y control industrial, Ingeniería Industrial, Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Electrónica, Automatización, Mecatrónica, Regulación automática, Control óptimo, Servomecanismos, Control no lineal, Espacio de estados, Cibernética e Ingeniería de Sistemas. [Ref. 4.16-4.21]

RETOS

En la búsqueda de la utilización de la inteligencia artificial en la ingeniería, encontramos los siguientes retos:

- Conseguir materiales y esquemas de fabricación innovadores
- Fabricación de robots biohíbridos y bioinspirados

- Nuevas fuentes energéticas, tecnologías de batería
- Enjambres de robots
- Crear máquinas capaces de navegar y explorar en entornos extremos
- La inteligencia artificial (IA) aplicada a la robótica
- Ámbito de la biomedicina, las interfaces cerebro-computadora, con el ajuste óptimo en el rendimiento de las baterías (Battery Council International BCI)
- Robótica médica
- Adecuada interacción social de los robots para tratar que comprendan las complejas dinámicas sociales humanas, las normas morales y que se puedan integrar verdaderamente en nuestra vida social
- Abordar las cuestiones éticas y de seguridad en las innovaciones robóticas

OPORTUNIDADES

Hay que detectar las oportunidades que se dan con el empleo de la inteligencia artificial, entre ellas encontramos las siguientes:

- Mejorar labores como procesar números y moverse con precisión
- El aprendizaje activo de las materias de Ciencias, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas, entre otras
- Brindan una ventaja competitiva
- Nos permiten alcanzar nuestros objetivos de manera más efectiva
- Nos proporcionan un mayor bienestar
- Mayor velocidad
- Reducción de costos
- Ir a donde el humano no puede
- Hacer tareas que para el ser humano serían mortales.
- Modelo para robots versátiles y sostenibles
- Los robots, amigos de la salud humana y del medio ambiente

CONCLUSIONES

En conclusión, podemos deducir que la robótica es una de las ramas más completas de la tecnología. Un solo robot requiere conocimientos de microtecnología, de informática para programarlo, de física para poder calcular cuáles serán sus limitaciones y capacidades a la hora de levantar pesos, transportar objetos, de telecomunicaciones si requieren control etc.

Debido a que los sistemas de automatización son muy complejos, se planean algunos factores generales que se deben analizar antes de empezar algún proyecto, se debe tener el detalle de toda la descripción del sistema a automatizar, para tener una visión del resultado.

Hay que realizar una correcta forma de diseñar, construir y operar, las edificaciones sustentables de hoy sin comprometer los recursos naturales de las futuras generaciones (Reporte Bruntland).

Un diseño bajo el concepto regenerativo y un sitio que

satisface eficientemente las necesidades energéticas de una edificación y sus ocupantes de las energías renovables (solar, eólica, geotérmica, etc.), los diseñadores deben aplicar los principios holísticos de diseño, y tomar ventaja de los activos de origen natural disponibles, como la orientación solar pasiva, la ventilación natural, iluminación natural, masa térmica y de refrigeración durante la noche.

Hasta hoy, en ausencia de una normatividad eficiente, se han impulsado esquemas de certificación internacionales y se ha apoyado en trabajos de investigación centrados en temas energéticos, entre otros.

Apoyar la investigación, desarrollo tecnológico y formación de capacidades y su aplicación. Hay un creciente interés por los gobiernos y la industria de la construcción.

Existe un nicho de mercado para quienes puedan alcanzar los mejores estándares de sostenibilidad en el corto y mediano plazo estarán reforzados con incentivos económicos. La normatividad deberá ser redactada en base a objetivos, no tecnologías, a fin de favorecer la innovación e investigación.

Las certificaciones, estándares y normas internacionales son buenas referencias para la industria de la Construcción, pero en muchos casos no son aplicables para Puerto Rico, México, las Américas y el Mundo, se convierten en adaptaciones caras y poco prácticas.

Hay que trabajar en hacer nuestras propias normas, ya que son nuestras referencias técnicas, para dar elementos legales a nuestros Reglamentos y Leyes.

El reto está, no solamente en incorporar la tecnología que existe, sino en saber seleccionarla; saber dónde, cómo y en qué medida aplicarla, integrarla adecuadamente y, sobre todo, alinearla a los objetivos estratégicos de los negocios para que estas agreguen valor y no únicamente costo.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), también conocidos como Objetivos Globales, fueron adoptados por Naciones Unidas en 2015 como un llamamiento universal para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que para el 2030 todas las personas disfruten de paz y prosperidad.

Los 17 ODS están integrados, reconociendo que la acción en un área afectará los resultados en otras áreas y que el desarrollo debe equilibrar la sostenibilidad social, económica y ambiental. Los países se han comprometido a priorizar el progreso de los más rezagados.

En el ODS 13 (acción por el clima), se busca mitigar el calentamiento global que para poder lograrlo es necesario no superar un aumento de la temperatura promedio del Planeta de más de 1.5 °C para el 2030, por encima de los niveles preindustriales, las emisiones de los gases efecto invernadero (GEI), que ya deberían estar disminuyendo y necesitan reducirse casi a la mitad para 2030, dentro de solo cinco años, estamos muy lejos de lograr este objetivo.

Es crucial tomar medidas urgentes y transformadoras que vayan más allá de meros planes y promesas. Esto exige aumentar las ambiciones, abarcar economías enteras y avanzar hacia un desarrollo resiliente al clima, al tiempo que se traza una trayectoria clara para lograr cero emisiones netas. El tiempo se acaba y es necesario tomar medidas inmediatas

para evitar consecuencias catastróficas y garantizar un futuro sostenible a las generaciones venideras.

Los ODS son el plan maestro para conseguir un futuro sostenible para todos. Se interrelacionan entre sí e incorporan los desafíos globales a los que nos enfrentamos día a día, como la pobreza, la desigualdad, el clima, la degradación ambiental, la prosperidad, la paz y la justicia. Para no dejar a nadie atrás, es importante que logremos cumplir con cada uno de estos objetivos para el beneficio de la humanidad.

REFLEXIÓN FINAL

La inteligencia artificial permite la automatización de una gran variedad de procesos complejos que aún requerían de intervención humana. Con el Big data, es imposible analizar la cantidad de datos con herramientas tradicionales, debido a que nos rebasó la cantidad y las diferentes fuentes de datos, por lo anterior la inteligencia artificial nos ayudara el poder cumplir con los 17 ODS y 169 metas, para lograr frenar el calentamiento del Planeta y el cambio climático, que tanto nos afecta año con año y poder lograr que las edificaciones y ciudades sean sostenibles en lo ambiental, social y financiero para las futuras generaciones.

REFERENCIAS CITADAS

- [1.1] Trabajo de Incorporación de Guillermo Casar Marcos a la Academia Panamericana de Ingeniería API con el título: “De las Edificaciones Sustentables a las Ciudades Sustentables, retos y tendencias, un nuevo paradigma”, en la Ciudad de Panamá, el 26 de Octubre 2016.
- [1.2] Diaz Infante de la Mora, Luis Armando, Curso de Edificación, Editorial Trillas, 3 era edición, México, 2018.
- [1.3] Francis D. K. Ching, Ian M. Shapiro, Arquitectura ecológica, Editorial Gustavo Gili GG, segunda edición revisada y ampliada, 2024.
- [1.4] Organización de Naciones Unidas ONU, Objetivos de Desarrollo Sostenible <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [1.5] Environmental Protection Agency (EPA-USA).
- [1.6] Net Zero Energy Military Installations: A Guide to Assessment and Planning. Samuel Booth, John Barnett, Kari Bruman, Josh Hambrick and Robert Westby. Technical Report NREL/TP-7A2-48878 August 2010.

- [1.7] “Edificaciones Sustentables Oportunidades y Retos”, Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA México-USA-Canadá), 2008.
- [1.8] NMX-AA-164-SCFI-2013 Edificaciones Sustentables. Norma Mexicana.
- [1.9] LEED Green Associate Candidate Handbook. Green Building Certification Handbook (GBCI). October 2011.
- [1.10] LEED Reference Guide New Construction and Remodeling (LEED-NC)
- [1.11] Net-Zero Energy Buildings Take Hold in U.S. By Lacey Johnson and Climate Wire Article Scientific American March 7, 2012.
- [1.12] Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente LGEEPA en México.
- [1.13] Programa de Certificación de Edificaciones Sustentables (PECES) – México.
- [1.14] NOM-007-ENER-2004 Eficiencia energética para sistemas de alumbrado en edificios no residenciales, México, 2004
- [1.15] NOM-008-ENER-2001 Eficiencia energética en edificaciones.- Envoltante de edificios no residenciales, México, 2001
- [1.16] NOM-020-ENER-2011 Eficiencia energética en edificaciones.- Envoltante de edificios para uso habitacional, México 2011.
- [1.17] NMX-J-C-I-489-ANCE-ONNCCE-NYCE-2014 Centro de Datos de Alto Desempeño – sustentable y energético – requisitos y métodos de comprobación.
- [1.18] NMX-C-506-ONNCCE-2015 Industria de la construcción – edificaciones - Comisionamiento
- [1.19] NMX-C-527-1-ONNCCE-2017 Modelado de Información para la Construcción MIC (conceptos de Modelaje BIM)
- [1.20] BREEAM International New Construction, Technical Manual, SD5075 – 1.0:2013, Issue date: 09/04/2014.
- [1.21] De la casa pasiva al estándar Passivhaus. Michael Wassouf, Gustavo Gili GG, 2016
- [2.1] WIKIPEDIA Inteligencia artificial https://es.wikipedia.org/wiki/Inteligencia_artificial
- [2.2] «¿Qué es la inteligencia artificial?». Diccionario de informática en la nube de Microsoft Azure.
- [2.3] Real Academia Española. «inteligencia artificial». Diccionario de la lengua española (23.ª edición). <https://dle.rae.es/diccionario>
- [2.4] Rusell, S. J.; Norvig, P. (2004), «Inteligencia artificial. Un enfoque moderno», Pearson Educación (Segunda edición) (Madrid), ISBN 978-84-205-4003-0.
- [2.5] Rodríguez, Txema (27 de enero de 2017). «Machine Learning y Deep Learning: cómo entender las claves del presente y futuro de la inteligencia artificial». Xataka.
- [2.6] Barrio, Miguel Ángel (26 de febrero de 2016). «La importancia de la ética en la inteligencia artificial». El País.
- [2.7] Sabán, Antonio (8 de mayo de 2016). «¿Qué es la singularidad tecnológica y qué supondría para el ser humano?». Hipertextual.
- [2.8] Thompson, Elaine (6 de septiembre de 2019). «10 ejemplos de que ya dependes de la IA en tu vida diaria». BBVA OpenMind.
- [2.9] Bitdefender. «Bitdefender`s Pick. Alan Turing, Father of Artificial Intelligence!». Hot for Security.
- [2.10] «Andreas Kaplan; Michael Haenlein (2019) Siri, Siri in my Hand, who`s the Fairest in the Land? On the Interpretations, Illustrations and Implications of Artificial Intelligence, Business Horizons, 62(1), 15-25».
- [2.11] «La Inteligencia artificial en la estrategia | McKinsey». www.mckinsey.com.
- [2.12] Toews, Rob. «What Does “Artificial Intelligence” Really Mean?». Forbes. Consultado el 1 de agosto de 2023.
- [2.13] Schank, Roger C. (1991). «Where’s the AI» (PDF). AI Magazine 12 (4): 38.
- [2.14] Kaplan, Andreas; Haenlein, Michael (2018). Siri, Siri in my Hand, who’s the Fairest in the Land? On the Interpretations, Illustrations and Implications of Artificial Intelligence.

- [2.15] Ferrer Abello (1986). «Introducción a la Inteligencia Artificial». En Antonio M. Ferrer Abello, ed. Inteligencia Artificial y Sistemas Expertos. Ediciones Ingelek, S.A. p. 7-20. ISBN 84-85831-31-4.
- [2.16] Rouhiainen, Lasse (2018). Inteligencia Artificial 101 cosas que debes saber hoy sobre nuestro futuro. Alienta.
- [2.17] López Takeyas, Bruno. «Introducción a la Inteligencia Artificial».
- [2.18] McCarthy, John (11 de noviembre de 2007). «What Is Artificial Intelligence». Sección «Basic Questions».
- [2.19] Grau-Luque, Enric (5 de mayo de 2024). Inteligencia artificial, aprendizaje profundo, y por qué las polillas vuelan hacia la luz. ISBN 979-8324882860.
- [2.20] «QUÉ ES LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL: su fascinante historia y cómo funciona | Servicios». La Voz del Interior. 7 de junio de 2024.
- [2.21] Russell, Stuart J.; Norvig, Peter. (2021). Artificial Intelligence: A Modern Approach (4ª edición). Hoboken: Pearson. ISBN 978-0134610993. LCCN 20190474.
- [2.22] Christian, Brian (2020). The Alignment Problem: Machine learning and human values. W. W. Norton & Company. ISBN 978-0-393-86833-3. OCLC 1233266753.
- [2.23] Vincent, James (15 de noviembre de 2022). «The scary truth about AI copyright is nobody knows what will happen next». The Verge.
- [2.24] Reisner, Alex (19 de agosto de 2023), «Revealed: The Authors Whose Pirated Books are Powering Generative AI», The Atlantic.
- [2.25] Alter, Alexandra; Harris, Elizabeth A. (20 de septiembre de 2023), «Franzen, Grisham and Other Prominent Authors Sue OpenAI», The New York Times.
- [3.1] WIKIPEDIA Ingeniería de control https://es.wikipedia.org/wiki/Ingenier%C3%ADa_de_control
- [3.2] John G. Landels: “Water-Clocks and Time Measurement in Classical Antiquity”, “Endeavour”, Vol. 3, No. 1 (1979), pp. 32–37 (35)
- [3.3] IEEE Robotics and Automation Society. Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR) summer school. Curtin Research Publications, 2012.
- [3.4] The International Journal of Automation and Control (IJAAC) publica investigaciones sobre varios aspectos de la ingeniería de control.
- [3.5] Institute of Control Engineering en la Hamburg University of technology, TUHH.
- [3.6] Control Group in the Department of Engineering at the University of Cambridge.
- [3.7] The Control and Dynamical Systems Interdisciplinary Ph.D. Program of CalTech.
- [3.8] Control Engineering articles, like designing safety circuits.
- [3.9] Control Group in the Department of Engineering at the University of Oxford.
- [3.10] Nanorobotics Control - Computational Nanomechanics Lab. en el Center for Automation de Nanobiotech (CAN).
- [4.1] WIKIPEDIA Robótica <https://es.wikipedia.org/wiki/Rob%C3%B3tica>
- [4.2] «Definición de robótica – Real Academia Española de la Lengua RAE». <https://dle.rae.es/diccionario>
- [4.3] «Robótica - Concepto, historia, tipos, beneficios y características». <https://concepto.de/>
- [4.4] «Industry Spotlight: Robotics from Monster Career Advice».
- [4.5] Nocks, Lisa (2007). The robot : the life story of a technology. Westport, CT: Greenwood Publishing Group.

- [4.6] Bermejo, Sergi (2003). Desarrollo de robots basados en el comportamiento. Ediciones UPC. ISBN 84-8301-712-1. Págs. 26-27.
- [4.7] Rus, Daniela (2019). «Robótica: una década de transformaciones». BBVA Open Mind.
- [4.8] Svoboda, Elizabeth (25 de septiembre de 2019). «Your robot surgeon will see you now». *Nature* 573 (7775): S110-S111. Bibcode:2019Natur.573S.110S. PMID 31554995. doi:10.1038/d41586-019-02874-0.
- [4.9] «Robotics: About the Exhibition». The Tech Museum of Innovation.
- [4.10] Imitation of Life: A History of the First Robots
- [4.11] Waurzyniak, Patrick (2006-07). «Masters of Manufacturing: Joseph F. Engelberger». *Society of Manufacturing Engineers* 137.
- [4.12] «Poliarticulados - ROBOTICA». sites.google.com.
- [4.13] Nevejans, Nathalie (octubre de 2016). «European civil law rules in robotics». *European civil law rules in robotics*.
- [4.14] «Drones». Federal Aviation Administration, U.S. Department of Transportation.
- [4.15] «Automated Vehicles». National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), U.S. Department of Transportation.
- [4.16] Inzunza Acedo, Beatriz Elena; Wright, Claire; Ghys, Tuur; Cools, Pieter (4 de septiembre de 2020). «Imaginaris de la robotización: la automatización desde la perspectiva del empleado». *Estudios sociológicos*, 38(113), 567-599. doi:10.24201/es.2020v38n113.1923.
- [4.17] Lahera Sánchez, Arturo (2021). «El debate sobre la digitalización y la robotización del trabajo (humano) del futuro: automatización de sustitución, pragmatismo tecnológico, automatización de integración y heteromatización.». *RES. Revista Española de Sociología*, 30(3), 8.
- [4.18] Moreno, Luis (2019). «Robotización, neofeudalismo e ingreso básico universal». *Nueva sociedad*, 2019, no 279, p. 149-158.
- [4.19] Gentile, Alessandro (2019). «Review of Democracias robotizadas. Escenarios futuros en Estados Unidos y la Unión Europea, by L. M. Fernández & R. Jiménez». *Reis: Revista Española de Investigaciones Sociológicas*, no. 166, 2019, pp. 182-85. JSTOR.
- [4.20] McGaughey, Ewan (16 de octubre de 2019). Will robots automate your job away? Full employment, basic income, and economic democracy. *S2CID* 243172487. SSRN 3044448. doi:10.31228/osf.io/udbj8.
- [4.21] Autor, David H. (1 de agosto de 2015). «Why Are There Still So Many Jobs? The History and Future of Workplace Automation». *Journal of Economic Perspectives* 29 (3): 3-30. doi:10.1257/jep.29.3.3. hdl:1721.1/109476.

RESEÑA

Ingeniero Civil y académico de la Facultad de Ingeniería de la UNAM con 36 años de antigüedad dando clases en Licenciatura y Posgrado. Académico Titular de la Academia Panamericana de Ingeniería, actualmente Miembro Director Alterno 2018-2026. Académico Titular de la Academia de Ingeniería de México (AIM), Secretario (2024-2026), Presidente de la Comisión de Especialidad de Ingeniería Ambiental 2018-2022. Su desarrollo profesional es en planeación, diseño, construcción y operación & mantenimiento en proyectos de Edificios Inteligentes y Edificaciones Sustentables, con Certificaciones tipo LEED & Procesos de Comisionamiento Cx y Modelaje BIM. Miembro del Grupo Asesor de la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) 2005-2008 México-USA-Canadá, en Edificaciones Sustentables.



ANÁLISIS DEL FLUJO PROMEDIO ANUAL EN LOS RÍOS PRINCIPALES EN PUERTO RICO ENTRE 1960-2023

Ing. Ferdinand Quiñones Márquez

ABSTRACTO

Este artículo resume los resultados de análisis sobre la tendencia en tiempo de la cantidad de escorrentía promedio anual en los ríos principales en Puerto Rico (PR), documentando que no han ocurrido mermas significativas en dichos caudales entre el 1960 al 2023. Datos de la escorrentía diaria medida en 24 estaciones hidrográficas operadas por el United States Geological Survey (USGS) a través de Puerto Rico se utilizaron para evaluar las tendencias en la escorrentía promedio anual. Tendencias estadísticas fueron determinadas con la función disponible en Excel, utilizando un valor de 32 en el número mínimo de años de datos de flujos promedios anuales en las estaciones seleccionadas. Excepto en dos estaciones en la Región Sur de PR, las curvas de tendencia promedio ilustran que la cantidad de escorrentía anual no disminuyó en el período de estudio de hasta 43 años. Solamente en tres estaciones del USGS las tendencias apuntan a un aumento leve en la escorrentía durante el período de análisis.

INTRODUCCIÓN

Puerto Rico (PR) y sus islas adyacentes disfrutaron de precipitación abundante la mayor parte de los años. Datos de precipitación en PR publicados por el Servicio Nacional de Meteorología (NWS) documentan que el promedio normal de lluvia de las décadas de 2010 al 2020 es de unas 69 pulgadas anuales (NWS, 2022). La abundante lluvia sobre la mayor parte de PR induce escorrentías caudalosas gran parte del año, particularmente en la región norte durante abril a mayo y septiembre a diciembre. Estudios anteriores de las tendencias históricas de la lluvia en PR documentan que en la mayor parte de la isla el promedio de lluvia anual no ha disminuido desde el 1960 al 2022 (Quiñones, 2019). Desde el 1960, la escorrentía en casi todos los ríos principales en PR se mide con precisión en la red hidrográfica operada por el US Geological Survey (USGS) en cooperación con agencias del gobierno de PR. Sensores automáticos miden con precisión la magnitud de los flujos, transmitiendo los datos cada 15 minutos a centros de análisis automatizados operados por el USGS. Curvas de calibración del flujo han sido desarrolladas en cada estación mediante aforos periódicos llevados a cabo por técnicos del USGS.

OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El objetivo del estudio y los análisis fue determinar si la escorrentía en los ríos principales en Puerto Rico ha disminuido debido al cambio climático que el planeta experimenta. Aunque las temperaturas en Puerto Rico han aumentado debido a los efectos del cambio climático, no se ha definido si dichos aumentos en temperaturas han resultado en mermas

en la escorrentía pluvial que discurre por las cuencas de la isla. Estudios anteriores (Acta Científica, 2022) documentan que entre el 1900 al 2022 no han ocurrido mermas significativas en la precipitación que se registra sobre PR. En este estudio se analizan y resumen los datos de la escorrentía pluvial medida por el USGS en las cuencas principales en PR, incluyendo el cálculo de las tendencias en dichas escorrentías entre el 1960 al 2022. Afortunadamente se dispone para este período de 62 años de datos del flujo instantáneo, diarios y promedios anuales en 102 estaciones pluviométricas operadas por el USGS en Puerto Rico.

REVISIÓN DE LITERATURA

Aunque desde finales del siglo 19 existen datos parciales de la escorrentía pluvial en algunos ríos en Puerto Rico, no es hasta la creación en 1942 de la “Autoridad de las Fuentes Fluviales, AFF” que se inician programas formales e intensos de monitoreo del flujo diario previo a la construcción de presas y embalses. Estaciones para medir el flujo instantáneo fueron construidas por la AFF en puntos de los ríos donde se desarrollaron anteriormente embalses y plantas hidroeléctricas, o se planificaban nuevos embalses y generadoras (Compendio de Presas y Embalses de Puerto Rico, AFF, 2009). Varias de las represas actuales (Comerio; Carite; Coamo; Guajataca; Guayabal; Melanía; y Patillas) fueron construidas por empresas privadas entre el 1907 al 1941. La Autoridad de las Fuentes Fluviales de Puerto Rico (AFF, creada en el 1941 y ahora la Autoridad de Energía Eléctrica (AEE)) inició la construcción de la mayor parte de los embalses existentes en PR.

Aunque la AEE inició programas de medición de los flujos en los ríos que alimentan los embalses en PR, estos “aforos” y datos del flujo diario eran intermitentes, limitando su uso para determinar tendencias de flujo. No es hasta el 1960 cuando el US Geological Survey (USGS) inicia programas formales para medir con precisión el flujo diario en los ríos principales en PR. En cooperación con la AEE y la Junta de Calidad Ambiental (JCA), el USGS construyó unas 40 estaciones hidrológicas en los ríos principales en PR, enfocadas en el flujo de entrada a los embalses de la AEE. Esta red hidrológica del USGS se expandió en el tiempo operando al presente unas 105 estaciones en los ríos y embalses, donde se determina el flujo instantáneo cada 15 minutos con sensores automáticos (o el nivel de los embalses). Estas estaciones transmiten los datos a sistemas satelitales y directamente a los archivos del USGS (Figura 1).



Figura 1. Estaciones hidrológicas para medir el flujo instantáneo, diario y anual en los ríos y embalses principales en Puerto Rico (2024)

METODOLOGÍA APLICADA

El portal del USGS en la Internet (<https://waterdata.usgs.gov/pr/nwis/rt>) permite acceso con una dilación de solo 15 minutos a la cantidad de flujo calculada en cada estación con algoritmos derivados de las medidas de flujo instantáneo. Los archivos del USGS incluyen el promedio anual de escorrentía (Q_{anual}), expresado en pies cúbicos por segundo (pcs) por año. Esta estadística de flujo permite evaluar las tendencias anuales a largo plazo de la escorrentía en los ríos principales en PR donde el USGS opera las estaciones. En los análisis de escorrentía en este estudio se escogieron 24 de las estaciones del USGS en PR con un número mínimo de 32 años de datos del flujo promedio diario, mensual y anual. El siguiente es el enlace de acceso a el portal del USGS y los datos de flujo en las estaciones en PR, incluyendo los flujos promedios anuales:

https://waterdata.usgs.gov/nwis/annual?referred_module=sw&state_cd=pr&site_tp_cd=ST&index_pmcode_00060=1&format=station_list&group_key=NONE&list_of_search_criteria=state_cd%2Csite_tp_cd%2Crealtime_parameter_selection

El archivo de datos del USGS permite seleccionar los datos a extraerse en una tabla donde se ilustran el número de años de datos, así como el promedio anual de escorrentía en pies cúbicos por segundo (pcs). La Tabla 1 siguiente ilustra los datos de la escorrentía promedio anual en la estación del Río de La Plata en Comerío (USGS 50043800) para los años del 1990 al 2023. El programa permite escoger entre el año calendario y el tradicional “año agua” utilizado por el USGS (octubre 1ro. a septiembre 30).

Luego de conectarse al portal del USGS donde se archivan los datos de flujos cada 15 minutos en las estaciones seleccionadas, el sistema del USGS genera una tabla de datos similar a la adjunta para el Río Grande de La Plata en Comerío. En esta Tabla 1 se ilustran el número de la estación (50043800); el parámetro de flujo promedio anual (000060); un código interno del sistema del USGS (123461); y el promedio anual de escorrentía medida, en pies cúbicos por segundo (pcs). La ubicación general de las estaciones hidrográficas operadas por el USGS en PR se ilustran en la siguiente Figura 2 y se detallan en la Tabla 2 siguiente.

Tabla 1. Ejemplo de extracción de los archivos del USGS del flujo promedio anual en el Río La Plata en Comerío

```
# USGS 50043800 RIO DE LA PLATA AT COMERIO, PR
#
# Explanation of Parameter Code and ts_id used in the Statistics Data
# parameter_cd Parameter Name ts_id
# 00060 Discharge, cubic feet per second 12346
#
```

agency_cd	site_no	parameter cd	ts_id	year	nu	mean_va
5s	5s	3n	4s	12n		
USGS	50043800	00060	123461	1990	45	
USGS	50043800	00060	123461	1991	131.3	
USGS	50043800	00060	123461	1992	126.8	
USGS	50043800	00060	123461	1993	132.6	
USGS	50043800	00060	123461	1994	35.3	
USGS	50043800	00060	123461	1995	131.9	
USGS	50043800	00060	123461	1996	239	
USGS	50043800	00060	123461	1997	60.8	
USGS	50043800	00060	123461	1998	232.9	
USGS	50043800	00060	123461	1999	160.6	
USGS	50043800	00060	123461	2000	267.5	
USGS	50043800	00060	123461	2001	101.4	
USGS	50043800	00060	123461	2002	204.7	
USGS	50043800	00060	123461	2003	162.2	
USGS	50043800	00060	123461	2004	517.2	
USGS	50043800	00060	123461	2005	269	
USGS	50043800	00060	123461	2006	337.9	
USGS	50043800	00060	123461	2007	71.5	
USGS	50043800	00060	123461	2008	288.7	
USGS	50043800	00060	123461	2009	201.6	
USGS	50043800	00060	123461	2010	303	
USGS	50043800	00060	123461	2011	672.8	
USGS	50043800	00060	123461	2012	186.1	
USGS	50043800	00060	123461	2013	164	
USGS	50043800	00060	123461	2014	110.8	
USGS	50043800	00060	123461	2015	52	
USGS	50043800	00060	123461	2016	112.9	
USGS	50043800	00060	123461	2017	452.6	
USGS	50043800	00060	123461	2018	232.6	
USGS	50043800	00060	123461	2019	101.3	
USGS	50043800	00060	123461	2020	142.2	
USGS	50043800	00060	123461	2021	148.1	
USGS	50043800	00060	123461	2022	249.7	
USGS	50043800	00060	123461	2023	193.4	

Los datos en las estación en el Río Guajataca aguas abajo del Embalse Guajataca no fueron utilizadas en los análisis debido a la corta duración de la estación operada por el USGS.



Figura 2. Ubicación general de las estaciones hidrográficas operadas por el USGS en Puerto Rico utilizadas en los análisis de tendencias de escorrentía promedio anual, incluyendo la estación en el Río Guajataca (no utilizada).

Tabla 2. Estaciones hidrológicas operadas por el USGS en Puerto Rico y utilizadas en los análisis de flujos promedios anuales

NÚMERO USGS	RÍO Y NOMBRE ESTACIÓN	AÑOS DE DATOS
50014800	Río Camuy cerca Bayaney	1985-2022
50028000	Río Tanamá cerca de Utuado	1960-2022
50029000	Río Grande de Arecibo en Central Cambalache	1970-2016
50032100	Río Grande de Manatí cerca Morovis	1965-2022
50035000	Río Grande de Manatí en Ciales	1961-2022
50043800	Río Grande de La Plata en Comerío	1989-2022
50047850	Río de Bayamón en Bayamón	1989-2022
50049100	Río Piedras en Hato Rey	1989-2022
50055000	Río Grande de Loíza en Caguas	1962-2023
50057000	Río Gurabo en Gurabo	1962-2023
50065500	Río Mameyes en Sabana	1984-2023
50064200	Río Grande en el Verde	1972-2022
50071000	Río Fajardo cerca de Fajardo	1962-2023
50008100	Río Humacao en Las Piedras	1988-2022
50090500	Río Maunabo en Lizas, Maunabo	1972-2023
50092000	Río Grande de Patillas cerca de Patillas	1967-2023
50100200	Río Lapa en Rabo del Buey en Salinas	1989-2023
50106100	Río Coamo en Coamo	1988-2022
50111500	Río Jacaguas en Juana Díaz	1985-2003
50112500	Río Inabón en Real Abajo	1966-2023
50124200	Río Guayanilla cerca de Guayanilla	1986-2023
50138000	Río Guanajibo cerca de Hormigueros	1974-2022
50144000	Río Grande de Añasco cerca de Añasco	1964-2023
50147800	Río Culebrinas cerca de Moca	1968-2023

METODOLOGÍA APLICADA

Los datos de la magnitud de la escorrentía promedio anual en las estaciones hidrográficas operadas por el USGS en PR se extrajeron de sus archivos históricos en la Internet (enlace a sección del portal del USGS donde se archivan los datos de flujo promedio anual):

Gráficas del flujo promedio anual (en pies cúbicos por segundo, pcs) para 24 estaciones con un mínimo de 32 años calendario de datos fueron generadas utilizando Excel. En cada una de las gráficas se generó una curva del promedio acumulativo (“moving average”) utilizando el algoritmo disponible en Excel. Este algoritmo permite determinar si las tendencias son de aumentos, no cambio, o disminuciones en los valores de escorrentía promedio anual. Los resultados se resumen en la siguiente Tabla 3, y los hidrogramas de cada estación en el apéndice de este texto.

Tabla 3. Resumen de las tendencias en la magnitud de la escorrentía promedio anual en estacione hidrográficas operadas por el USGS en Puerto Rico

NÚMERO USGS	RÍO Y NOMBRE ESTACIÓN	AÑOS DE DATOS	TENDENCIA EN ESCORRENTÍA
50014800	Río Camuy cerca Bayaney	1985-2022	SIN CAMBIO
50028000	Río Tanamá cerca de Utuado	1960-2022	AUMENTO LEVE
50029000	Río Grande de Arecibo en Central Cambalache	1970-2016	SIN CAMBIO
50032100	Río Grande de Manatí cerca Morovis	1965-2022	SIN CAMBIO
50035000	Río Grande de Manatí en Ciales	1961-2022	SIN CAMBIO
50043800	Río Grande de La Plata en Comerío	1989-2022	AUMENTO LEVE
50047850	Río de Bayamón en Bayamón	1989-2022	SIN CAMBIO
50049100	Río Piedras en Hato Rey	1989-2022	SIN CAMBIO
50055000	Río Grande de Loíza en Caguas	1962-2023	SIN CAMBIO
50057000	Río Gurabo en Gurabo	1962-2023	SIN CAMBIO
50065500	Río Mameyes en Sabana	1984-2023	SIN CAMBIO
50064200	Río Grande en el Verde	1972-2022	REDUCCIÓN LEVE
50071000	Río Fajardo cerca de Fajardo	1962-2023	SIN CAMBIO
50008100	Río Humacao en Las Piedras	1988-2022	AUMENTO LEVE
50090500	Río Maunabo en Lizas, Maunabo	1972-2023	SIN CAMBIO
50092000	Río Grande de Patillas cerca de Patillas	1967-2023	SIN CAMBIO
50100200	Río Lapa en Rabo del Buey en Salinas	1989-2023	SIN CAMBIO
50106100	Río Coamo en Coamo	1988-2022	SIN CAMBIO
50111500	Río Jacaguas en Juana Díaz	1985-2003	SIN CAMBIO
50112500	Río Inabón en Real Abajo	1966-2023	AUMENTO LEVE
50124200	Río Guayanilla cerca de Guayanilla	1986-2023	REDUCCIÓN LEVE
50138000	Río Guanajibo cerca de Hormigueros	1974-2022	SIN CAMBIO
50144000	Río Grande de Añasco cerca de Añasco	1964-2023	AUMENTO LEVE
50147800	Río Culebrinas cerca de Moca	1968-2023	SIN CAMBIO

ANÁLISIS DE LOS DATOS DE LA ESCORRENTÍA TOTAL ANUAL EMANANDO DE LOS RÍOS PRINCIPALES HACIA LAS COSTAS DE PUERTO RICO

Los datos de la escorrentía en las estaciones hidrográficas operadas por el USGS en PR permiten calcular la tendencia histórica de la escorrentía que descarga hacia las costas. Este cálculo se logra sumando los promedios anuales de cada estación del USGS, y integrando estos promedios individuales en una gráfica que ilustre la tendencia anual promedio de escorrentía. Las siguientes Tablas 4.a y 4.b ilustran los totales de escorrentía anual entre 1988 al 2022 en 24 estaciones del USGS en PR utilizadas en los análisis (no existen suficientes datos de escorrentías anuales en las cuencas de los ríos Guajataca y Camuy, en el noroeste de PR).

Tabla 4.a. Datos de escorrentía anual en las estaciones del USGS entre Arecibo y Fajardo

AÑO	Río Grande de Arecibo	Río Manatí en Morovis	Río Manatí en Ciales	Río la Plata en Comerío	Río Bayamon en Bayamon	Río Comerío en Comerío	Río Piedras en Hato Rey	Río loiza en Caguas	Río Gurabo en Gurabo	Río Maneyes en Marney	Río Grande en El Verde	Río Fajardo en Fajardo
1988	380.6	79.1	182.5					243.7	258.2	69.2		84.5
1989	391.6	70.2	210.2	122.1	36.5		58.8	91.1	188	65.6		99.7
1990	315	74.9	228.6	116.5	30.8	145	44.5	152.2	54.3	52.4	30	47.6
1991	267.1	52.5	133.7	56.9	19.2	131.3	35.8	220.4	82.7	46.9	21.7	40.7
1992	337	88.2	266.7	145.4	27.7	126.8	75.5	210.3	111.8	58.7	31	47
1993	287.1	84	207.8	116.5	30.4	132.6	57.7	99.2	115.3	58.7	25.4	55.6
1994	106.3	14	36.8	33.5	7.96	35.3	29	155.1	43.5	33.1	19.5	19
1995	264.3	60.8	212.2	146.8	24.9	131.9	65.4	305.3	66.9	45.9	25.1	61.4
1996	352.6	87	255.8	236.1	53.9	239	74.4	162.2	160.1	55.4	36.5	75.6
1997	315	49.6	130.1	88.3	22.3	60.8	47.9	240.3	61.7	49	28.5	55.7
1998	568.4	104.5	291.4	264.7	67.8	232.9	74.6	226.8	103.3	63.1	58	89.6
1999	646.6	134.5	392	224.7	75.4	160.6	46.1	220.3	152.7	59.7	55.7	95.4
2000	385.5	71.7	185.2	175.5	33.3	267.5	42	127.1	129.7	63	31.6	85.2
2001	287.2	50.9	151.7	141.9	34.9	101.4	53.2	192.1	100.1	37.5	42.2	33
2002	344.1	52.7	166	117.1	22.8	204.7	38.4	150.3	94.5	61.7	32.9	69.1
2003	337.9	75	233.9	433.4	41.6	162.2	55.1	407.3	118.7	52.7	55.4	53.8
2004	480.1	143.6	382.4	362.4	90.3	517.2	74.5	195.2	194.9	78.9	67.6	94
2005	670.7	158.2	482.5	335.6	77.2	269	71.3	297	146	66.9	46.4	80.6
2006	304.4	76.3	224	177.9	39.2	337.9	57.9	113	209.1	60	29.3	72.2
2007	439.2	66.8	227.5	208.1	39	71.5	50.6	263.4	69.5	35.5	33	33.1
2008	378.6	72	246.2	163.5	42.5	288.7	44.8	216.7	183.7	53.6	36.3	63
2009	918.8	92.3	288.7	200.3	93.4	201.6	61.1	299.5	134.1	60.2	33.8	64.7
2010	688	217	464.3	447	104.9	303	70.6	493.9	167.4	73.5	62.1	107.9
2011	576.5	210.5	456.4	543	49.9	672.8	91.5	249.9	290.9	58.1	63.1	98.4
2012	447.5	137.1	305.5	185.1	56.9	186.1	50.3	253.6	145.3	59.7	51.1	78.8
2013	323.9	83.3	165.2	146	28.3	164	70.8	224.6	147.7	61.6	56	73.3
2014	266.3	57.8	128.5	101.9	14.4	110.8	39.8	102.8	109.8	47.8	34	52
2015	479.1	44.5	121.4	78	25.2	52	28.4	233.3	54.1	38.7	18.4	31.6
2016	510	120	237.4	139.6	66.8	112.9	40.4	396.6	283.8	64.6	30.8	46.3
2017	650	75	774.4	518.3	29.4	452.6	85.1	313.9	188.9	87.7	63.7	107
2018	573	48	198.1	123.2	15.6	232.6	52.3	168.7	99.5	61.9	38.6	55.5
2019	324	50.7	145.5	101.3	49.1	101.3	34.5	127.3	72.5	60.4	25.1	48.4
2020	422	95.2	254.4	209.1	28.2	142.2	49.4	205.4	107.8	66.3	38.6	56.6
2021	322	63.6	402.8	71.4	61.6	148.1	43.5	225.8	166.4	50.3	27.9	52.8
2022	533	126.5	650	314.1	40	249.7	60.6	223.1	136.8	49.7	36	48.2

Tabla 4.b. Datos de escorrentía anual en las estaciones del USGS entre Humacao a Aguada

AÑO	Río Humacao en Humacao	Río Maunabo en Maunabo	Río Patillas en Patillas	Río Majada en Guayama	Río Lapa en Salinas	Río Coamo en Coamo	Río Jacaguas en Santa Isabel	Río Iabon en Ponce	Río Guayanilla en Guayanilla	Río Guanajib en Yauco	Río Añasco en Añasco	Río Culebrinas en Aguada
1988	25		89.6			26	54.9	21.7	30.5	199.2	303.8	293.1
1989	25.4		60.1	4.14	3.37	10.1	13	15.3	21.2	233.3	338.9	268.3
1990	12.1		27.7	10.5	3.13	16.6	24	14.3	18.4	170.8	259.4	170.6
1991	16	25	45.4	3.25	11.2	36.8	60.9	20	27.3	157	342	244.5
1992	23.6	20	57.7	12.9	11.1	23.1	54.1	16.9	21.7	103.8	253.3	298.8
1993	18.7	16	49.3	3.92	3.19	20	50.5	19.3	32.7	227.7	428.2	263.2
1994	15.1	10.8	19.8	0.968	0.566	4.52	6.23	7.44	8.94	69.6	200.4	176.9
1995	15.9	19.6	35.9	2.94	4.55	10.6	12.7	13	13.4	147.8	305.2	306.4
1996	29	26.3	60.6	12.2	9.54	19.8	35.9	19.2	22	133.9	428.8	290.7
1997	21.1	14.4	37.2	6.4	1.15	9.81	14.4	9.53	13	108.7	254.3	194.6
1998	27.2	27.1	85.8	19.6	14.1	40.9	93.1	22.7	28.7	257.3	511.8	445.5
1999	29.7	21.3	75.5	15.7	7.3	36	68.6	26.1	34.7	209.3	555.5	405.6
2000	25.7	19.6	62.8	8.96	9.69	36.3	71.9	23.5	31.2	174	496	278.3
2001	15.1	14.6	38.2	3.99	3.88	17.7	46.3	20.7	23.4	197.6	290.8	371.2
2002	22.1	23.1	58.1	2.35	3.53	13.1	43.1	15.4	15.4	120.5	404.6	340.3
2003	16.3	23.5	52.8	19.2	2.85	11.6	21.8	14	16.6	93.1	304.1	320.1
2004	32.7	34.4	108.4	15.3	16.9	45.5	90.2	27.2	47.3	330.9	549	250.4
2005	25	13.8	56.3	22.3	6.39	35.8	80.2	22.5	34.8	210.6	475.2	380.7
2006	33.9	26.8	94.3	6.98	12.3	42.8	95.2	22.5	30.3	267.7	407.2	264.9
2007	19.7	12.9	38.9	8.34	1.22	14.1	28	13.5	16.1	120.7	293.4	314.7
2008	27	30.2	94.1	12.6	14.3	30.9	78.3	19	37.9	215.7	399.5	239.5
2009	23.7	25	66.2	3.42	3.87	20.3	38.3	15.5	19.8	177.8	371.6	322.3
2010	40	18	95.1	22.4	5.35	18	57.2	20.9	33.5	296	530.2	301.4
2011	41.6	34.2	175.3	34.8	37.3	96.5	152.8	28	33.2	336.4	509.2	338
2012	23.7	17.1	58.6	4.61	6.2	36	52.4	19.7	27.4	189.5	355.6	221.1
2013	23.8	16.9	53.4	2.41	3.69	13.8	48.9	19.3	24.1	182.4	351.6	272.6
2014	27.7	17.7	54.5	2.46	1.82	9.69	28.7	14.4	11.1	91.2	268.4	193.2
2015	12.2	7.6	26	1.29	1.1	8.34	21.6	14.1	12.2	144.3	343.3	235
2016	23	16.1	52.6	2	1.49	14.1	28.3	22.7	19	151.3	372.6	361.1
2017	29.8	39.7	81.2	5	18.5	131.6	120	34.4	44.8	457.6	1033	702.3
2018	27.4	32.3	91.2	5.39	27.8	63.8	94.2	29.3	19.8	279.2	491.3	472.3
2019	18.7	15.7	51.3	1.1	1.5	20.2	25.3	18.3	13.9	144.4	393	348.3
2020	15.1	9.75	34.5	4.33	4.01	21.4	58.1	18.2	15.1	252.6	498.7	180.7
2021	27	15	39.6	1.82	5.09	20.1	40.6	15.7	11.9	150.7	408.7	229.6
2022	28.2	13.1	41.1	2	12.1	90.4	54.7	16.5	19.9	382.9	452.7	264

La tendencia histórica de la suma de la escorrentía anual en las estaciones de medir flujos operada por el USGS en Puerto Rico se ilustra en la siguiente Figura 3. La gráfica en la imagen refleja los períodos anuales de sequías y de lluvias abundantes entre el 1989 a 2022, con un aumento general durante ese período. Son notables la sequía de 1994 y las escorrentías record durante el paso del huracán María en el 2017.



Figura 3. Tendencia histórica en el total de escorrentía descargada anualmente entre el 1989 al 2022 por los ríos principales en Puerto Rico

Las figuras ilustrando la escorrentía total anual en cada una de las 24 estaciones del USGS se incluyen en el apéndice a este texto.

CONCLUSIONES

Los resultados de los análisis se incluyen en el Apéndice 1, que consiste en gráficas individuales de las tendencias en la magnitud de la escorrentía promedio anual en 24 de las estaciones hidrográficas operadas por el USGS en PR incluidas en el análisis. La Tabla 3 resume los resultados, estableciendo lo siguiente:

1. En 17 de las 24 estaciones hidrográficas evaluadas, las curvas de tendencia del promedio acumulativo no reflejan cambios en la magnitud de la escorrentía histórica entre el 1964 al 2023.
2. En cinco (5) de las estaciones el análisis revela aumentos leves en la magnitud de la escorrentía histórica. Estos aumentos responden en parte a los flujos significativamente elevados en esas estaciones inducidos durante el paso de los huracanes María (2017) y Fiona (2022)
3. En dos (2) de las estaciones se revelan disminuciones leves en la magnitud de la escorrentía anual histórica. Estas reducciones reflejan en gran parte aumentos recientes en las extracciones de agua para instalaciones de la AAA.

El análisis documenta que, en la mayor parte de las cuencas hidrológicas en Puerto Rico, la escorrentía promedio anual no ha aumentado o disminuido significativamente desde el 1960 (cuando el USGS comenzó a publicar datos de escorrentía instantánea y promedios anuales medidos en su red de estaciones hidrográficas en la isla). El análisis no evalúa tendencias mensuales en la escorrentía en Puerto

Rico. Aunque el total de escorrentía promedio anual no haya cambiado significativamente por el cambio climático, su distribución mensual podría haberse modificado por aguaceros y tormentas más intensas en ciertos meses del año.

RECOMENDACIONES

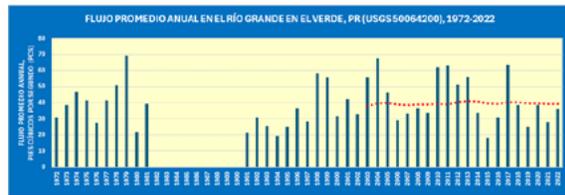
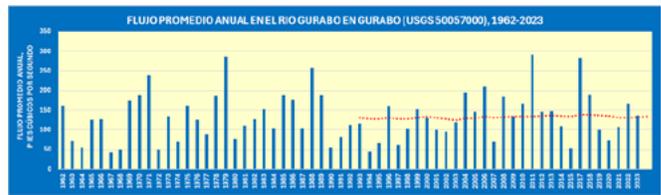
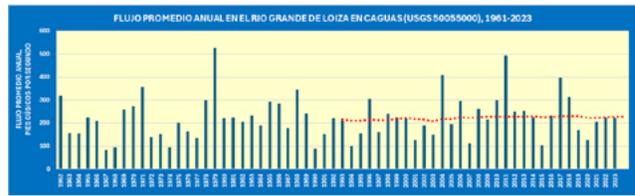
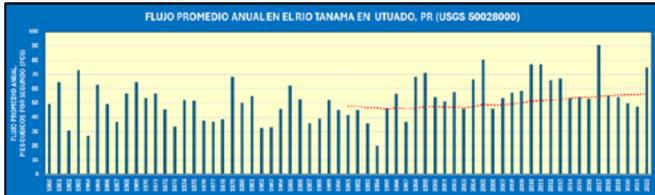
Aún cuando los datos del USGS establecen que los flujos promedios anuales en los últimos 62 años no han disminuido en la mayor parte de los ríos principales en Puerto Rico debido al cambio climático, es importante continuar el monitoreo y análisis periódicos (cada 10 años) de estas tendencias. Es de gran importancia que el DNRA, la AEE y otras agencias del Gobierno de PR continúen los programas cooperativos con el USGS de monitoreo continuo del flujo en estos y otros ríos principales en la isla.

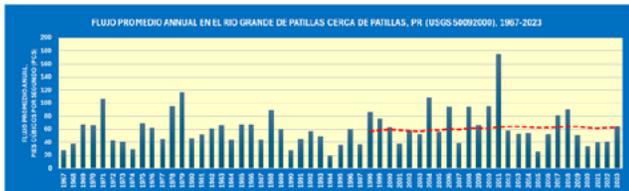
REFERENCIAS

- Compendio de Represas y Embalses de Puerto Rico, 2009, Unidad de Inspección y Reglamentación para la Seguridad de Represas y Embalses de Puerto Rico, Autoridad de Energía Eléctrica de Puerto Rico (AEE).
- Climate Change Implications for Tropical Islands: 2016, Interpolating and Interpreting Statistically Downscaled GCM Projections for Management and Planning, DOI: 10.1175/JAMC-D-15-0182.1, 2016 American Meteorological Society.
- Feng Gao 1, Yunpeng Wang 2, Xiaoling Chen 3, * and Wenfu Yang 4,5, 2020, Trend Analysis of Rainfall Time Series in Shanxi Province, Northern China (1957–2019) WATER MPDI.
- IPCC, Climate change 2007, “Climate change impacts, adaptation and vulnerability”. Working group II contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report. Summary for policymakers, 23(2007).
- Kalnay, E. and Cai, M., 2003, “Impact of urbanization and land use changes on climate.” Nature 423, 528–531.
- NOAA, 2022, Portal de NOAA de datos históricos de precipitación en Puerto Rico y sus islas de Mona, Vieques y Culebra, 1898-2020: enlace
- NWS, 2019, Portal del NWS en Puerto Rico documentando la lluvia promedio anual en la isla en el 2019, Puerto Rico Climate Change Council (PRCCC), 2013, Puerto Rico’s State of the Climate 2010-2013: Assessing Puerto Rico’s Social-Ecological Vulnerabilities in a Changing Climate. Puerto Rico Coastal Zone Management Program, Department of Natural and Environmental Resources, NOAA Office of Ocean, and Coastal Resource Management. San Juan, PR.
- Quiñones, F., 2022, Análisis estadísticos de la lluvia promedio diaria en Puerto Rico entre 1900-2019 no reflejan disminuciones en la precipitación anual en la mayor parte de la isla: Acta Científica, 2022.

Runkle, J., K. Kunkel, and L. Stevens, 2018: Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands State Climate Summary. NOAA Technical Report NESDIS 149-PR, 4 pp.
 USGS, 2024, Datos de escorrentía en los ríos principales en Puerto Rico (enlace <https://waterdata.usgs.gov/nwis>).

ANEJOS: Gráficas individuales de para cada una de las estaciones hidrográficas operadas por el USGS en Puerto Rico incluidas en los cálculos de tendencias estadísticas de la escorrentía promedio anual. Las líneas rojas cortadas ilustran la tendencia estadística





RESEÑA

El ingeniero Ferdinand Quiñones, PE, completó su Bachillerato en Ciencias en Ingeniería Química de la Universidad de Puerto Rico en 1965, una Maestría en Ingeniería Ambiental de la Universidad de Florida en 1974, y es Candidato a Doctorado en Ingeniería Ambiental de la Universidad de Vanderbilt, 1988-90. El ingeniero Quiñones es un Ingeniero Profesional con licencia registrado en Tennessee y Puerto Rico.

Desde 2005 es consultor independiente en temas de agua y medio ambiente para PRASA. Tiene un conocimiento experto de los procesos de permisos Federales y del ELA para la mayoría de los proyectos, con relaciones a largo plazo con reguladores clave del ELA y Federales. Amplia experiencia en la preparación de solicitudes y obtención de permisos Federales y Puerto Rico para la ubicación de proyectos, incluidos subdivisiones; franquicias de agua, desalinización; tratamiento de aguas residuales; dragado, residuos sólidos y otros problemas ambientales.



PROFESSIONAL
LAND SURVEYORS
POSITIONING WITH CONFIDENCE



MFORCE
SURVEYING

ABOUT US:  Mforce Surveying PSC  Mforce_Surveying



CONTACT US:

-  787-979-9447
-  www.mforcegroup.com
-  info@mforcegroup.com
-  141 Ave. De Diego, San Juan
Puerto Rico 00927

CMA
ARCHITECTS &
ENGINEERS LLC

YOUR ONE STOP SHOP FOR YOUR NEXT PROJECT

Public Buildings • Housing • Health and Social Facilities • Communications • Energy • Transportation • Natural & Cultural Resources • Potable Water • Sanitary Sewer • Emergency/Services Temporary Facilities



BUILDING A **STRONGER** PUERTO RICO

civil • transportation • structural • architecture • mechanical • electrical • environmental
permitting • project & construction management



Puerto Rico | Florida | US Virgin Islands

www.cmapr.com



¡AIRE LIMPIO ES SALUD!

Por 30 años hemos trabajado para mantener un aire interior seguro y saludable.

Gracias por permitirnos apoyar a la industria y al valioso grupo de ingenieros que construyen el futuro de Puerto Rico.



IICRC
Institute of Inspection, Cleaning and Restoration Certification



CONTÁCTENOS

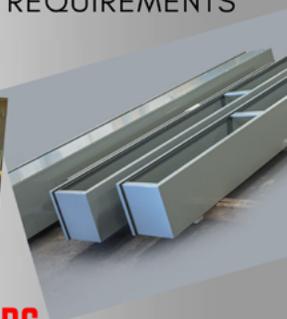


(787) 855-4869



SUBSTATION SPECIALIST. METAL MECHANICAL EXPERTS.

WE SPECIALIZE IN THE FABRICATION OF CUSTOM-ENGINEERED ELECTRICAL ENCLOSURES AND METAL STRUCTURES, TAILORED TO MEET DEMANDING TECHNICAL AND ENVIRONMENTAL REQUIREMENTS



REACH OUT WITH YOUR PROJECTS NEEDS

sales@metaelectrikpr.com

787-917-7888. 939-279-7538