

2.5.3 Variaciones interanuales y multianuales.

El número anual de huracanes que afectan a la estas provincias oscila entre 0 y 2. Se registraron 171 años sin impacto directo de huracanes, 40 años con solo uno y 8 años con dos. El coeficiente de variación es 2.02.

En el comportamiento de los ciclones tropicales se observa, además de variaciones interanuales, períodos de variaciones multianuales con mayor y menor actividad. Las décadas de los años 30, 40 y 80 del siglo XIX, las dos primeras décadas del siglo XX y los años 40 del mismo siglo fueron muy activos. Fue muy activo el período comprendido entre 1831 y 1851 (10 huracanes en sólo 21 años, una frecuencia media anual de 0.48); así como 1906 y 1919 (8 huracanes en 14 años, frecuencia media anual de 0.57). Por otra parte, entre 1951 y 1965 ningún huracán azotó directamente a este territorio, así como tampoco durante el período 1968-1984. Es posible señalar un período de 120 años (media anual de 0.35), entre 1831 y 1950, en el que ocurrieron 42 de los 56 huracanes registrados en todo el período estudiado (frecuencia media de 0.26).

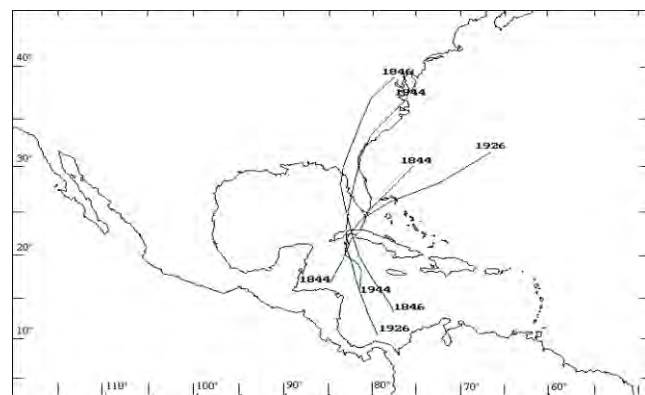


Figura 2.26. Trayectorias de los huracanes más intensos que han azotado a la provincia La Habana.

Al subdividir los dos últimos siglos en intervalos de 50 años se pudo observar que entre 1801 y 1850 ocurrieron 11 huracanes, entre 1851 y 1900 se observaron 16, cifra casi similar a la registrada entre 1901 y 1950, en este último período se registraron 17; pero entre 1951 y 2000 sólo ocurrieron 4 huracanes. Lo antes descrito indica que la zona analizada ha transitado por una relativa tranquilidad en cuanto a la afectación de huracanes durante las últimas 6 décadas, aunque han enfrentado situaciones muy adversas con tormentas tropicales, como Frederick 1979 y Alberto 1982, debido a las torrenciales lluvias y las grandes inundaciones que estas produjeron, así como con el intenso huracán Charley en el 2004.

El comportamiento multianual antes descrito se ha visto reflejado en que la serie del número anual de huracanes que afecta a la provincia de La Habana presente una tendencia decreciente, aunque no estadísticamente significativa.

En los últimos años, diversos autores han prestado una gran atención a las variaciones multidecadales de los ciclones tropicales. Dicho comportamiento se ha relacionado con las fluctuaciones de largo período de la temperatura superficial del mar que se observan en el océano Atlántico (Goldenberg *et al.*, 1998). Sin embargo, por el momento no es posible predecir hasta cuándo durará el actual período de poca actividad en las provincias estudiadas

2.5.4 Los huracanes intensos.

Se consideran huracanes intensos a aquellos que han afectado a las provincias de Artemisa y Mayabeque con categoría 3, 4 ó 5 de la escala *Saffir - Simpson*. Un total de 14 huracanes fueron identificados de este modo (Tabla 2.12). Casi todos los huracanes intensos ocurrieron en octubre (el 92%). Nueve de ellos (75%) azotaron este territorio en los primeros 20 días de dicho mes. Todos estos se formaron en el Mar Caribe (no se ha podido identificar la zona de origen de los huracanes de 1810 y 1837) y se movieron con una pronunciada componente norte. De forma general afectaron poco antes o poco después de haber efectuado la recurva. Sólo el huracán de 1888 se produjo en el mes de septiembre.

El período de 120 años transcurrido entre 1831 y 1950 fue también muy activo en cuanto a los huracanes intensos (promedio de un huracán cada 10.9 años), al ocurrir 11 de los 12 registrados en los 200 años estudiados (promedio de un huracán cada 16.7 años). Sin embargo, es posible detectar un período de mayor actividad entre 1837 y 1910 (74 años) en el que ocho de estas importantes tormentas afectaron al territorio, para un promedio de un huracán cada 9.25 años. Desde el año 1948, ningún huracán de gran intensidad (categoría 4 ó 5 de la *Saffir-Simpson*) ha afectado a las provincias habaneras.

La importancia de conocer el comportamiento climático de los huracanes intensos esta basada, fundamentalmente, en el impacto que los mismos han causado sobre esta zona del país. Los centenares de víctimas y los grandes daños materiales ocasionados son una muestra de su capacidad destructiva y de la necesidad de estar debidamente preparados ante tal evento atmosférico.

2.5.5. Conclusiones.

Los ciclones tropicales han sido históricamente el fenómeno natural que más frecuentemente ha propiciado la ocurrencia de situaciones de desastre en las provincias Artemisa y Mayabeque. Las principales catástrofes han estado relacionadas con el impacto de los huracanes intensos.

Estas provincias son azotadas por huracanes con una frecuencia importante desde junio hasta noviembre. Dicha afectación se concentra grandemente entre agosto y octubre, cuando ocurrieron más de las tres cuartas partes de todos los casos observados. La mayoría de ellos describieron trayectorias con una marcada componente sur - norte.

En el comportamiento de estas tormentas se observan variaciones multianuales. El número anual de huracanes que afectan a estos territorios oscila entre 0 y 2. Períodos de mayor y menor actividad se intercalan a lo largo del período estudiado. Durante las últimas cinco décadas ha existido una relativa tranquilidad, ya que sólo fueron afectadas por 7 huracanes entre 1951 y 2009 (media de 0.137), aunque ha enfrentado situaciones muy adversas con tormentas tropicales muy lluviosas. Esta variación de carácter multianual ha condicionado la existencia de una tendencia decreciente en la actividad de huracanes, aunque no estadísticamente significativa.

La frecuencia de huracanes intensos es también relativamente alta. La inmensa mayoría ocurrió en octubre y provenían del Mar Caribe. Once de ellos se presentaron entre 1837 y 1948. Desde entonces ningún otro ha afectado el territorio estudiado.

2.6. Principales resultados

En el informe "*Segunda Evaluación de las Variaciones y Tendencias del Clima en Cuba*" se expresa que en el país se han observado variaciones climáticas importantes, asociadas a señales de diferente frecuencia, magnitud y origen. En el presente estudio se han hecho análisis y apreciaciones que permiten opinar con seguridad que:

- En la estación de Güira de Melena la temperatura superficial del aire se ha incrementado significativamente en 0.8°C desde el año 1965 hasta el presente.
- Al igual que en el caso de Cuba, el incremento de la temperatura en Güira de Melena está condicionado por el significativo incremento de la temperatura mínima, calculado en alrededor de 1.1°C. Sin embargo, en esta estación es posible apreciar también un incremento de la temperatura máxima de aproximadamente 0.5°C.
- Como consecuencia del comportamiento antes descrito, se ha registrado una significativa disminución de la oscilación térmica media diaria de aproximadamente -1.2 °C.
- Durante los últimos 30 años, la humedad relativa y la tensión del vapor de agua han mantenido sus conocidas marchas diaria, anual e interanual en el área, con variaciones relativamente pequeñas en su comportamiento. En consecuencia, las anomalías reportadas han sido pequeñas, aunque se observan desviaciones positivas consecutivas en la HR durante los últimos años en Batabanó.
- La tensión del vapor de agua presenta tendencias crecientes significativas en el período lluvioso del año.
- En la zona sur de los territorios analizados el comportamiento de la lluvia es consistente con el comportamiento general de la lluvia en Cuba y las características físico geográficas de la provincia. Las anomalías en los acumulados anuales de las lluvias han mostrado una tendencia al incremento aunque no significativas estadísticamente, vinculadas con la tendencia al incremento en el período poco lluvioso, debido a la reducción de las magnitudes negativas desde mediados de los años 70.

- A pesar de la ligera tendencia a la reducción en el periodo lluvioso, esta no indica un incremento en los déficits moderados y severos en la zona de estudio. De manera general las tendencias son similares a las que se vienen presentando a escala regional, aun cuando son menos marcadas.
- Los huracanes azotan con una frecuencia importante desde junio hasta noviembre. Dicha afectación se concentra grandemente entre agosto y octubre.
- A pesar del inicio de un período muy activo sobre Cuba de la actividad de huracanes, desde 1996, estas provincias han continuado transitando por una relativa tranquilidad, aunque ha enfrentado situaciones muy adversas con tormentas tropicales muy lluviosas. Esta variación de carácter multianual ha condicionado la existencia de una tendencia decreciente en la actividad de huracanes, aunque no estadísticamente significativa.

2.7. Conclusiones Generales

Para Cuba, las frecuentes anomalías climáticas de las tres últimas décadas han tenido un impacto apreciable sobre un amplio espectro de actividades socioeconómicas. Este trabajo sintetiza la evaluación científica sobre las variaciones recientes del clima en una región ubicada hacia el centro oeste de La Habana.

El examen de las características climáticas de la región y las variaciones observadas permiten expresar que el clima en la región estudiada mantiene características y variaciones consistentes con las reportadas para Cuba.

En particular, el incremento de la temperatura superficial del aire y la reducción del rango diurno de la temperatura, son aspectos inherentes a las variaciones observadas en el clima de Cuba que muestran un apreciable nivel de coincidencia con los resultados de este estudio. Por el contrario, la disminución de la actividad de huracanes se diferencia sustancialmente con lo observado para toda Cuba, por lo que puede producirse un cambio sustancial en esta tendencia en los próximos años.

2.7. Referencias.

Centella, A., L. Naranjo y L. Paz Castro (1997): Variaciones y cambios del clima en Cuba. Instituto de Meteorología. 57 pp.

Vega, R., V. Cutié y A. Centella (1987): Análisis del comportamiento de los totales de lluvia caída en Cuba sobre la base de una clasificación de sequía. Informe Técnico. Instituto de Meteorología, Cuba. 25 pp.

1. Boudet, D. (2009): Análisis de las temperaturas extremas medias mensuales en Cuba en el período 1971 – 2008. En Memorias del Congreso de la Sociedad Meteorológica de Cuba 2009.
2. Hernández, M. (2009): Análisis espacial de las temperaturas extremas medias mensuales (1971 – 2008). En Memorias del Congreso de la Sociedad Meteorológica de Cuba 2009.
3. Lecha, L., L. Paz y L. Naranjo (1994): El Clima de Cuba.
4. Pérez Suárez, R., C. Fonseca, B. Lapinel, C. González, E. Planos, V. Cutié, M. Ballester, M. Limia y R. Vega (2009): “Segunda evaluación de las variaciones y tendencias del clima en Cuba”. Informe científico. Instituto de Meteorología. La Habana, 75 pp.

5. Davitaya, F. F. y Trusov, I.I. (1965): Los recursos climáticos de Cuba. Edit. INRH-ACC, La Habana, 79 pp.
6. Editorial Academia (1996): Tabloide de Meteorología y Climatología.
7. Guevara, A.V.; Campos, A.; León, A.; Vega, R. (2004): El Dique Sur de La Habana (Cuba) y su influencia en el comportamiento de elementos climáticos seleccionados. Revista Cubana de Meteorología. Volumen 11, No. 1, pp 93-100.
8. Instituto de Geografía e Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía (1989): Nuevo Atlas Nacional de Cuba. La Habana, Cuba, 105p.
9. Lecha, L. et. al. (1988): Los recursos climatoterapéuticos de Cuba. Dpto. de Climatología. Instituto de Meteorología de la Academia de Ciencias de Cuba (inédito).
10. Lecha, L.; Paz, L.; Lapinel, B. (1994): El Clima de Cuba. Editorial Academia, La Habana.
11. Mellado, E. y Borrajero, I. (1997): Software Winstat (Programa para el Cálculo de Índices de Tendencias en Series Temporales, Versión 2.0 - Beta). Instituto de Meteorología, La Habana. (Comunicación Personal).
12. Pérez Suárez, R., C. Fonseca, B. Lapinel, C. González, E. Planos, V. Cutié, M. Ballester, M. Limia y R. Vega (2009): "Segunda evaluación de las variaciones y tendencias del clima en Cuba". Informe científico. Instituto de Meteorología. La Habana, 75 pp.
13. Vannitsem, S. y Damaree, G. (1991): Détection et modélisation des sécheresses au Sahel. Hydrologie Continentale, Vol. 6, No. 2, pp. 155-171.
14. Vega, R. *et al* (1998): Variabilidad, anomalías, tendencias y puntos de cambio en series largas de datos de la temperatura media del aire y de totales de lluvia en Cuba. Informe Final. Proyecto 0301018 "Variabilidad del Clima, Detección de Cambios Climáticos y Pronóstico a Largo Plazo". Instituto de Meteorología (inédito).
15. Sneyers, R. (1975): Sur l'analyse statistique des series d'observations. Note Technique No. 143. OMM - No. 15, pp. 1-15.
16. Centella, A., L. Naranjo y L. Paz Castro (1997): Variaciones y cambios del clima en Cuba. Instituto de Meteorología. 57 pp.
17. Lecha, L.; Paz, L.; Lapinel, B. (1994): El Clima de Cuba. Editorial Academia, La Habana.
18. Guevara, A.V.; Campos, A.; León, A.; Vega, R. (2004): El Dique Sur de La Habana (Cuba) y su influencia en el comportamiento de elementos climáticos seleccionados. Revista Cubana de Meteorología. Volumen 11, No. 1, pp 93-100.
19. Ballester, M., González, C. y Pérez, R. (2004): Actividad ciclónica en las áreas del Océano Atlántico, Golfo de México, Mar Caribe y Cuba durante el período 1886 – 2002. Informe Científico: Pronóstico de la actividad ciclónica en la región del Atlántico Norte, con énfasis en el Caribe y Cuba. Instituto de Meteorología. 31 pp.
20. -----, -----, ----- (2009): Actividad ciclónica en las áreas del

21. océano Atlántico, Golfo de México, Mar Caribe y Cuba durante el período 1886-2008. Informe Final del Resultado 415.511. Instituto de Meteorología, CITMA. 88 pp.
22. García A. y Beauballet P. (1992): Sistema de información estadística sobre ciclones tropicales, Trabajos del 1er. Congreso Iberoamericano de Meteorología Tropical, Tomo I, 299 □ 302.
23. González, I., M. Limia, R. Vega y R. Pérez Suárez (2006): Climatología de los ciclones tropicales en Cuba. Informe Científico. Instituto de Meteorología. La Habana. 29 pp.
24. Landsea, C. W. (1992): A Climatology of Intense (or major) Atlantic Hurricanes. Mon. Wea. Rev. Vol 121. Nr. 6. 1703-1713 pp.
25. Limia, M. (1976) : Climatología y estadística de los ciclones tropicales en Cuba. UDICT, INSMET, CITMA. 15 pp.
26. Limia M. y L. Paz. (1994): Los Ciclones Tropicales. En El Clima de Cuba (Ed. Academia, La Habana): 121 □ 128.
27. Limia M., R. Vega y R. Pérez Suárez (2000): Climatología de los ciclones tropicales que han afectado a Cuba (1799 – 1998). En “Los ciclones tropicales de Cuba, su variabilidad y posible vinculación con los cambios globales”. Informe científico. Instituto de Meteorología. La Habana. 37 pp.
28. Pérez Suárez, R., Ballester, M., González, C. y Salas, I. (1991): Cambios Climáticos y Ciclones Tropicales. I Taller sobre Cambios Climáticos y sus consecuencias. (Inédito). Instituto de Meteorología. La Habana. 10 pp.
29., M. Limia y R. Vega (2000): Los ciclones tropicales que han afectado a las provincias de Ciudad de La Habana y La Habana. Boletín de la Sociedad Meteorológica de Cuba, Vol.6, No.1. <http://www.insmet.cu>
30., (2000): Cronología de los ciclones tropicales de Cuba. En “Los ciclones tropicales de Cuba, su variabilidad y posible vinculación con los cambios globales”. Informe Científico. Instituto de Meteorología. La Habana. 17 pp.
31., (2006): Reanálisis de las tormentas tropicales que afectaron a Cuba en el siglo XIX y de los huracanes de La Habana en el siglo XVIII. En “Climatología de los ciclones tropicales en Cuba”. Informe Científico. Instituto de Meteorología. La Habana. 14 pp.
32., M. Ballester, M. Limia, R. Vega y C. González (2009): Los huracanes. En “Segunda evaluación de las variaciones y tendencias del clima en Cuba”. Informe Científico. Instituto de Meteorología. La Habana. 11 pp.
33. Portela, M. (1985): Algunas cuestiones de la climatología de los ciclones tropicales en Cuba. Resúmenes del II Simposium Internacional. Lab. Conj. Cuba □ URSS de Meteorología Tropical (traducción al español). La Habana. (Ed. Hidromet., Leningrado): 112 □ 119.
34. Rodríguez, M. (1976): Cronología clasificada de los huracanes que han azotado a Cuba hasta 1975. UDICT, Instituto de Meteorología, La Habana. 7 pp.

35.----- y M. Ballester (1985): CLIMA. En Nueva Atlas Nacional de Cuba.
Instituto de Geografía. ACC. La Habana-Madrid.

CAPÍTULO 3. ESCENARIOS CLIMÁTICOS

Los Modelos Climáticos Globales (MCG) constituyen la mejor herramienta disponible actualmente para proyectar el clima futuro. Sin embargo, la utilización directa de sus salidas es a menudo inadecuada, debido a la limitada representación de los procesos de mesoescala, la topografía y la distribución de tierras y mares. Esto es particularmente cierto para variables en las cuales los MCG exhiben una escala espacial mucho mayor que la requerida para realizar los estudios de impactos.

En la Primera Comunicación Nacional de Cuba a la Convención Marco de Cambio Climático, la evaluación de las vulnerabilidades y de los impactos se basó en los escenarios climáticos desarrollados por Centella *et al* (1999), los cuales se obtuvieron utilizando el modelo climático simple *MAGICC/SCENGEN* (Wigley y Raper, 1992 y Hulme *et al*, 2000). La baja resolución espacial de aquellos resultados fue una limitante posterior para la realización de evaluaciones de impactos espacialmente detalladas y, por tanto, las investigaciones posteriores indicaron la necesidad de utilizar la reducción de escala para considerar las características particulares de las localidades y provincias. Conceptualmente, la reducción de escala se asocia a las técnicas de generar información en una resolución espacial más alta que la ofrecida por los modelos globales y requieren del uso de métodos dinámicos o estadísticos (Mears *et al.*, 2003 y Wilby *et al.*, 2004, respectivamente). En el año 2003, junto a la Universidad de las Indias Occidentales y al Centro Comunitario Caribeño de Cambio Climático, el Instituto de Meteorología de Cuba se enroló en una iniciativa regional orientada a la modelación regional del clima, con la asimilación del Modelo Climático Regional *HadRM3P*, encapsulado en el Sistema de Modelado Regional, más conocido como *PRECIS*. Los resultados iniciales de este proceso fueron documentados por Taylor *et al* (2007), Centella *et al* (2008), Centella *et al* (2009). En esencia los resultados de este esfuerzo permitieron que se pudieran desarrollar un nuevo conjunto de proyecciones futuras, las cuales han estado a disposición de la comunidad que evalúa los impactos en Cuba y fueron utilizados en las evaluaciones que se reportan en este capítulo específicamente para el estudio de caso en el sur de las provincias de Artemisa y Mayabeque.

3.1. Metodología de trabajo

3.1.1. El Sistema de Modelado *PRECIS*

PRECIS es un sistema de modelación climática regional desarrollado por el Centro *Hadley* del Reino Unido, que puede ser ejecutado en computadoras personales. El sistema está compuesto por: i) un modelo atmosférico y de la superficie terrestre (*HadRM3P*), que puede ser aplicado a cualquier área del globo terrestre para generar proyecciones detalladas del cambio climático; ii) una interfase simple para fijar los parámetros y ejecutar el modelo; e iii) un paquete de visualización y procesamiento de datos que permite mostrar y manipular los resultados del modelo climático regional (Jones *et al*, 2004).

El área para la cual se desarrollaron los experimentos puede apreciarse en la Figura 3.1 y fue seleccionada como un dominio óptimo, considerando que la misma era lo suficientemente reducida como para poder realizar los diferentes experimentos con los recursos computacionales disponibles, y lo suficientemente grande para captar la

influencia de los procesos de mayor escala que tienen implicaciones en el comportamiento del clima de la Región del Caribe.

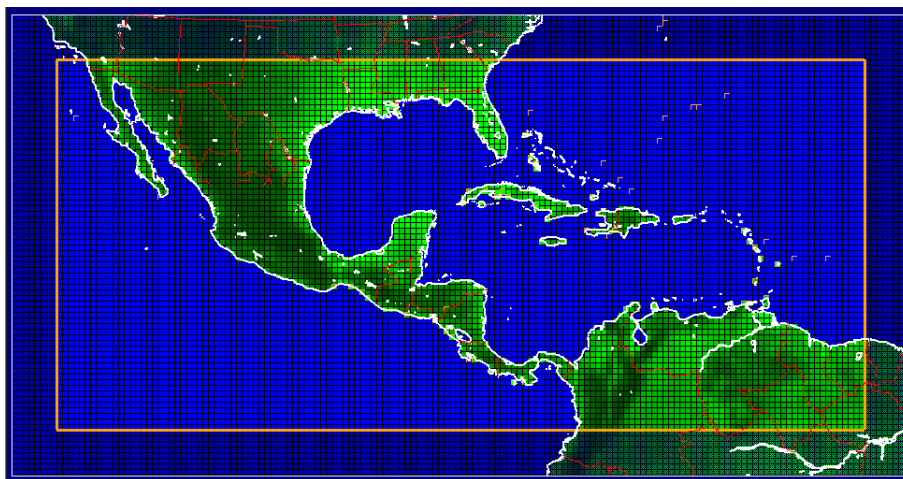


Figura 3.1. Dominio del modelo PRECIS fijado para la realización de los experimentos. El área comprendida entre el límite exterior e interior del dominio se corresponde con la zona "buffer", cuyos datos no son considerados.

Las condiciones de contorno utilizadas (información que alimenta al modelo en sus fronteras para que el mismo pueda generar información en su interior) y los datos asociados sobre las emisiones de Gases de Efecto de Invernadero (GEI) se describen a continuación:

Experimentos de "rebanadas temporales" (time slices) del modelo atmosférico HadAM3P: en la práctica aquí se agrupan dos tipos de las condiciones de contorno; una para el período 1961-1990 y otra para el 2071-2100. Por simplicidad, se puede resumir que ambos tipos de condiciones de contorno se basan en los datos proporcionados por las salidas del modelo HadAM3P, el cual es una versión mejorada del modelo atmosférico de alta resolución (150 km) HadAM3H, derivado de la componente atmosférica del modelo completamente acoplado océano-atmósfera HadCM3 (Gordon *et al*, 2000).

- Experimentos de clima transitorio para el período 1960-2100 a partir del modelo acoplado ECHAM4: con estas condiciones se desarrollaron integraciones continuas con el PRECIS para un largo período de tiempo. Así fue posible obtener resultados para períodos intermedios como el 2050, sin la necesidad de utilizar otros artificios como el escalamiento de patrones (Mitchell, 2003), necesario en el caso de los asociados al HadAM3P. En este caso, las condiciones de contorno provienen de las salidas de dos integraciones de 141 años del modelo de circulación general acoplado océano atmósfera ECHAM4 del Instituto Max Planck, mientras que las relativas a la superficie del mar se toman directamente del modelo OPYC3, que es la componente oceánica del modelo ECHAM4. Cada una de las dos integraciones se corresponden con los escenarios SRES-A2 y SRES-B2, respectivamente, y antes de 1991 ambas son idénticas.

3.1.1.1. Habilidad para simular patrones climáticos observados.

Centella *et al* (2009) indican que las simulaciones con *PRECIS* muestran la existencia de sesgos asociados principalmente al campo de las precipitaciones, con una tendencia a reflejar menos precipitaciones que las observadas. Sin embargo, el empleo del Modelo Climático Regional presenta un valor añadido sobre los Modelos Climáticos Globales, pues reproduce con mejor habilidad (menor error) el comportamiento de la temperatura y la precipitación, fundamentalmente en la mesoescala, lo cual es un resultado deseado a la hora de utilizar los modelos regionales para la evaluación de impactos a escala local en lugar modelo globales.

Pero debe notarse que existen varios aspectos que complican el proceso de evaluación de la habilidad de los modelos. La identificación de errores en los modelos es un proceso difícil debido a la compleja, y a veces poco comprendida, naturaleza del clima (asociada al complejo funcionamiento del *Sistema Climático*), lo que hace difícil definir cuál de los muchos aspectos del clima es más importante para concluir que se tiene una buena simulación. En múltiples ocasiones existen limitaciones en cuanto a la existencia de datos observados fiables y consistentes para el clima actual, los cuales deben ser utilizados como patrón de comparación. Otras veces, las diferencias entre las bases de datos observados son notables y reflejan la existencia de significativas incertidumbres en el clima observado, que en ocasiones son superiores a los sesgos de los resultados de los modelos. En este contexto es importante significar que la evaluación de un buen desempeño para las condiciones actuales no garantiza una predicción adecuada para el futuro.

Tabla 3.1. Resumen descriptivo de experimentos realizados con *PRECIS*

No.	Nombre del Experimento	Condición de borde		Período
		Emisiones GEI	Datos	
1	HCT	Observadas	<i>HadAM3P</i>	1961-1990
2	HA2	<i>SRES A2</i>	<i>HadAM3P</i>	2071-2100
3	HB2	<i>SRES B2</i>	<i>HadAM3P</i>	2071-2100
4	ECT/EA2	Obs/ <i>SRES A2</i>	<i>ECHAM4</i>	1961-2100
5	ECT/EB2	Obs/ <i>SRES B2</i>	<i>ECHAM4</i>	1961-2100

3.1.2. La agricultura

Los escenarios para el potencial hídrico y la aridez fueron creados para derivar de ellos los impactos esperados sobre la producción agrícola y los ecosistemas naturales a nivel nacional. Estos escenarios constituyen entonces un complemento y no un alternativa a los estudios sobre los recursos hídricos realizados en el marco de la Segunda Comunicación Nacional.

Los escenarios de temperaturas y precipitaciones para todos los climas futuros fueron creados aplicando a una base mensual representativa del período 1961-1990 (Rivero y Rivero, 2009), obtenida con 60 estaciones meteorológicas distribuidas en del territorio nacional; y los valores de cambio fueron conseguidos del sistema de generación de escenarios *MAGICC/SCENGEN 4.1* (Wigley, 2003). La creación de escenarios para el resto de las variables climáticas resultó innecesario, dado que para la solución de las ecuaciones de balance hídrico se utilizó el modelo de climatología física de Budyko (Rivero *et al.*, 1999; Rivero, 2008; Rivero y Rivero, 2011a), mientras que para la estimación de la productividad primaria neta y la densidad potencial de biomasa, con y

sin inclusión del efecto de fertilización por dióxido de carbono, se emplearon los algoritmos de los modelos primarios contenidos en el modelo de impacto para ecosistemas terrestres (*TEIM 2.0*) elaborado por los autores (Rivero *et al.*, 1999; Rivero y Rivero, 2011b). Estos modelos primarios utilizan sus propias metodologías para la estimación de los parámetros requeridos.

Las estimaciones de impactos esperados son generalmente sacadas del cálculo de índices climáticos, como el Índice de Aridez del *PNUMA* (K), el Índice de Aridez Hidrológica (ϕ) definido por Rivero y Rivero (2009) y el Índice de Riábchikov (Ria), definido en Riábchikov (1976).

Las simulaciones numéricas de los cultivos agrícolas y ganado elegidos para el mencionado estudio de caso (papa, arroz, tabaco y porcino) aprovecharon la circunstancia de que tales cultivos son manejados con tecnologías de altos insumos, que permiten estimar los impactos esperados mediante la simulación de sus rendimientos potenciales, según la definición adoptada por la escuela holandesa de simulación de cultivos (Rivero, 2008). Por tanto, tales escenarios solo debían contener valores representativos de las temperaturas y la radiación solar global. Las bases de datos utilizadas para el clima de referencia, fueron la base mensual multianual elaborada por Rivero y Rivero (2009) y las series diarias 1994 – 2009 de las estaciones de Batabanó, Melena del Sur y Güira de Melena de la Red de estaciones del Instituto de Meteorología. Dado que en ningún caso se disponía de datos observados de la radiación solar global, este parámetro fue estimado a partir de las oscilaciones diurnas de la temperatura (Allen, 1997).

Los valores de las variables climáticas relevantes correspondientes a climas futuros en el intervalo 2020 - 2100, fueron obtenidos aplicando a sus valores en el clima de referencia, las magnitudes de cambio calculadas por *PRECIS*, anidado en los modelos de clima global *ECHAM4* y *HadCM3*, con escenarios de emisión de gases de efecto invernadero *SRES A2* y *SRES B2*, para las celdas representativas de la región de estudio. El proceso de reducción de escala utilizado fue el conocido como *Estándar* (Rivero, 2008). Estos nuevos climas estudiados corresponden a períodos normales de 30 años centrados en los años empleados para designarlos (2020, 2050, 2080 y 2100).

El proceso utilizado para generar los escenarios futuros con datos diarios fue diferente, dada la imposibilidad de identificar años modelados con años futuros reales y la presencia de tendencias de cambio climático en el clima de referencia. Para ello se diseñó un método progresivo para aplicar los cambios previstos por *PRECIS*, a la serie de datos diarios del clima de referencia (Rivero, 2011).

Los escenarios de valores mensuales así obtenidos fueron usados para la simulación de las respuestas del ganado porcino (Rodríguez, 2010) y de los cultivos de tabaco, papa y arroz, empleando los modelos biofísicos de cultivo *WOFOST 4.1* y *WOFOST 7.1.2* (Ittersum *et al.*, 2003). Los escenarios formados por series diarias de las variables relevantes fueron utilizados para simulaciones de las respuestas de los cultivos de papa y arroz, con fechas de siembra seleccionadas, con los modelos de cultivo incluidos en el sistema *DSSAT 4* (Rivero, 2011). Los escenarios para el potencial hídrico y la aridez en el sur de las provincias Artemisa y Mayabeque se elaboraron según la metodología que se describe posteriormente.

3.2. Patrones climáticos futuros.

Los patrones de cambio de la temperatura media del aire para el período 2071-2099, de acuerdo con los experimentos perturbados, según los escenarios de emisiones *SRES-B2* y *SRES-A2* (Figura 3.2), muestran un calentamiento sustancial sobre los territorios estudiados. Durante el periodo seco, los incrementos de temperatura oscilarán entre 2.6°C y 3.6°C, siendo relativamente menores para el experimento EB2. Para los meses de Mayo a Octubre los incrementos de temperatura proyectados son superiores, llegando a alcanzar magnitudes de 4.2°C (en la simulación EA2)

A diferencia de la elevada coherencia que existe entre las estimaciones futuras de la temperatura del aire, los resultados de la precipitación (Figura 3.3) muestran una mayor dispersión de valores tanto en magnitud como en signo. Esto se aprecia principalmente, en los estimados correspondientes al período poco lluvioso sobre la región occidental. Considerando las cuatro simulaciones, los valores oscilan entre -30% y 30% sobre el territorio que se estudia y las mayores diferencias se aprecian entre los modelos y no entre los escenarios de emisiones. Para el período lluvioso, el nivel de coincidencia es mayor sobre casi todo el país y los resultados indican que sobre la región del estudio de caso la precipitación podrá disminuir entre un 10 y un 20%, y sólo en una proyección se estiman incrementos marginales del 10%, muy cerca de la costa sur de la Llanura Habana-Matanzas.

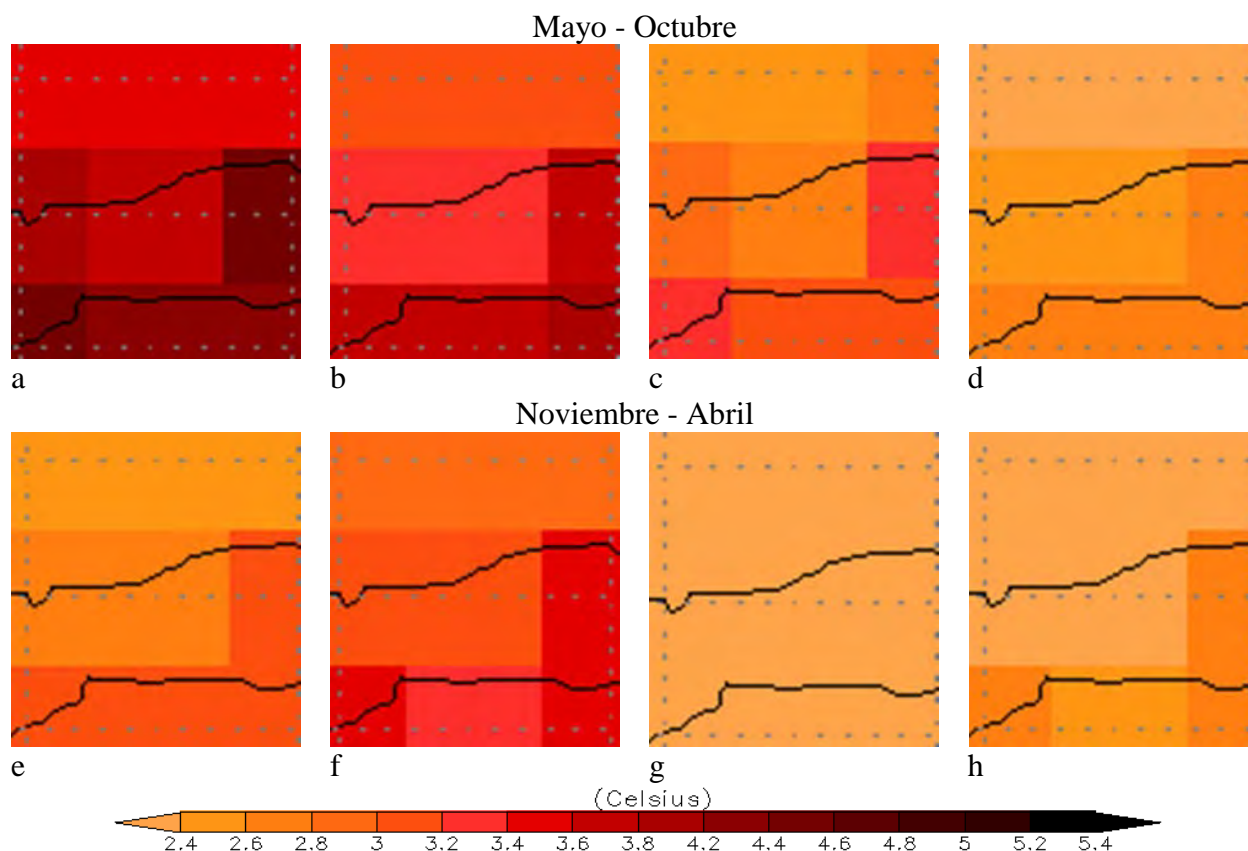


Figura 3.2. Patrón de cambio de la temperatura media superficial del aire para el período 2071-2100 respecto al período 1961-1990 para los meses de Mayo-Octubre y Noviembre-Abril, según las proyecciones del modelo PRECIS forzado por el modelo ECHAM4 (columna izquierda) y HadAM3P (columna derecha), de acuerdo al forzamiento de los escenarios de emisiones *SRES A2*(a,b,e,f) y *SRES B2*(c,d,g,h).

El incremento de la temperatura y la reducción predominante de la precipitación en el período lluvioso sobre la región, son coherentes con la disminución de la humedad relativa del aire (no mostrado). Este hecho parece indicar que como en otras regiones del país, la región del sur de la Habana presentará condiciones más secas que las actuales y que el efecto combinado del intenso calentamiento futuro y la reducción de las precipitaciones, principalmente durante el período lluvioso, resultará en una merma de los recursos hídricos disponibles. Este hecho sin embargo, debe ser comprobado y cuantificado a partir de las estimaciones de otras variables como el viento y la radiación solar, para poder evaluar adecuadamente sus implicaciones. En el caso de la velocidad del viento, puede mencionarse que sus magnitudes no presentarán variaciones sustanciales, aunque en términos generales habrá una ligera reducción en el futuro.

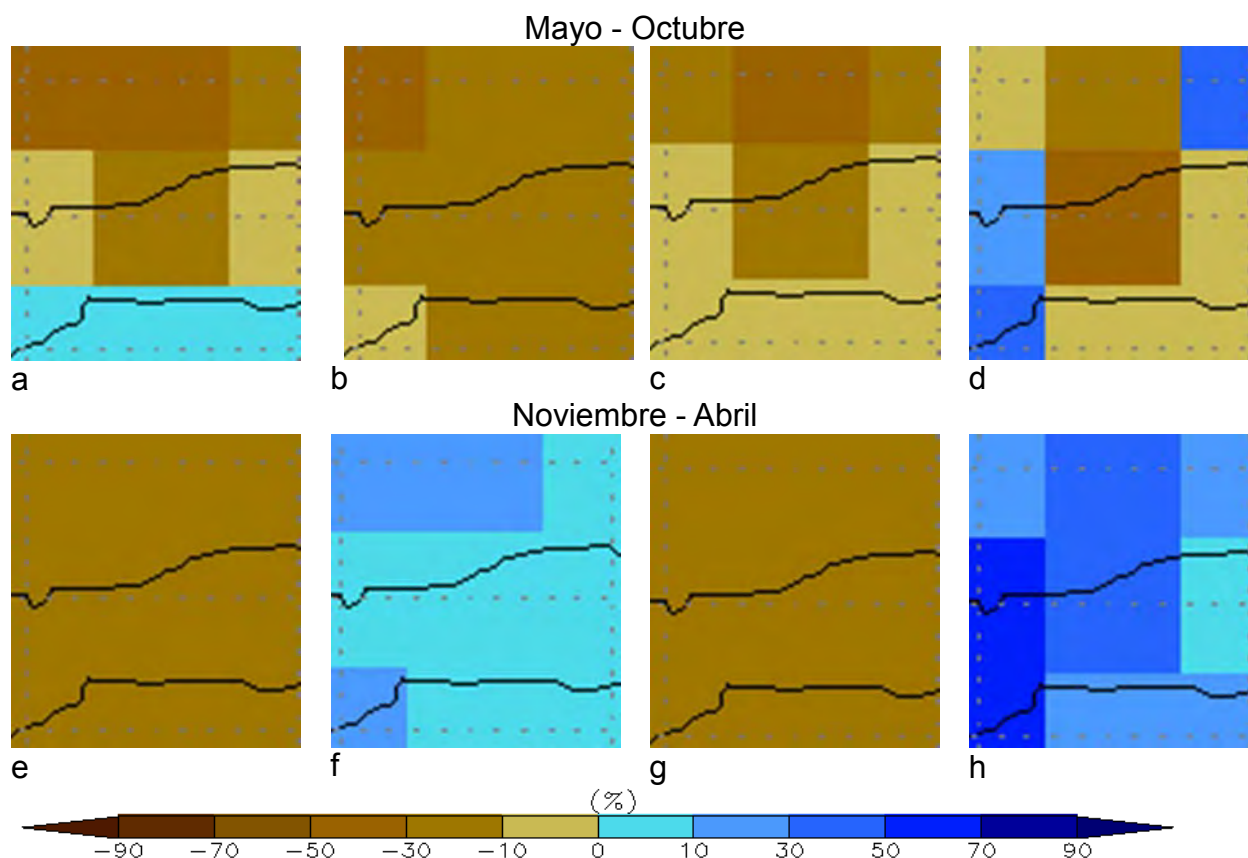


Figura 3.3. Patrón de cambio de la precipitación media para el período 2071-2100 respecto al período 1961-1990 para los meses de Mayo-Octubre y Noviembre-Abril, según las proyecciones del modelo PRECIS forzado por el modelo ECHAM4 (columna izquierda) y HadAM3P (columna derecha), de acuerdo al forzamiento de los escenarios de emisiones SRES A2(a,b,e,f) y SRES B2(c,d,g,h).

3.3. Escenarios para la agricultura

En general, existe una disminución progresiva de los rendimientos potenciales de los cultivos estudiados, acompañada de alteraciones en la duración en días de sus fases fenológicas y ciclos de cultivo (Rivero *et al.*, 2012). Las condiciones de estrés térmico del ganado porcino y sus indicadores bioproductivos se verán también deteriorados a lo largo del siglo actual, en todos los escenarios (Rodríguez, 2010).

3.3.1. Potencial hídrico y la aridez

Todos los escenarios creados para el presente estudio están asociados a un incremento sostenido de las temperaturas acompañado de una reducción progresiva de las precipitaciones durante el presente siglo. La combinación de estos factores conduce al incremento sistemático de la aridez del clima del país, en tal manera que las fronteras actuales que separan los climas más secos de la Región Oriental avanzarán paulatinamente hacia la Región Occidental actualmente más húmeda (Figura 5.3.7).

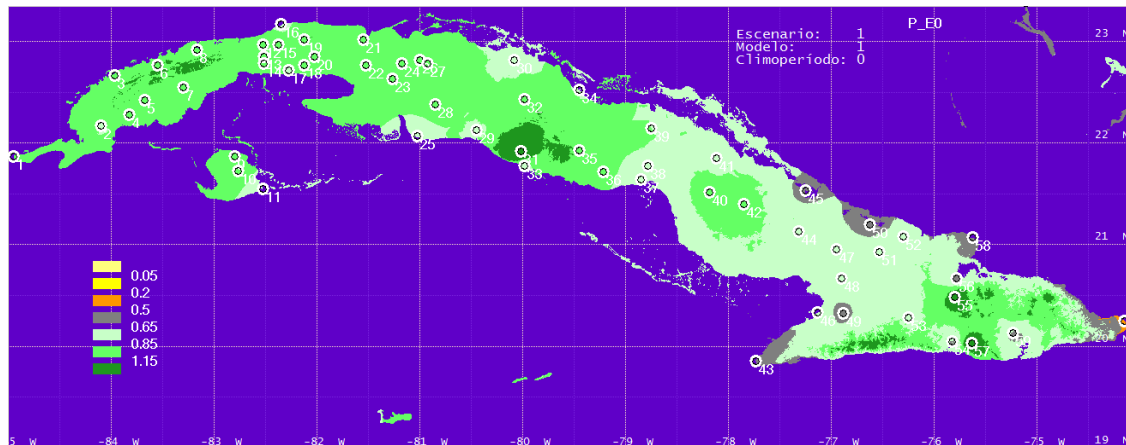


Figura 5.3.7. Representación espacial del índice de aridez (K) en el clima actual utilizando interpolación espacial por inverso del cuadrado de la distancia.

Este proceso de aridización será más rápido y notable en los escenarios de la familia SRES A2, aunque gradaciones semejantes serán también alcanzadas más tardíamente en la familia SRES B2 (Figuras 5.3.8 y 5.3.9). En términos generales, impactos similares se alcanzan en la familia SRES B2 años más tarde que en la familia SRES A2, lo que es especialmente notable en la segunda mitad del siglo actual.

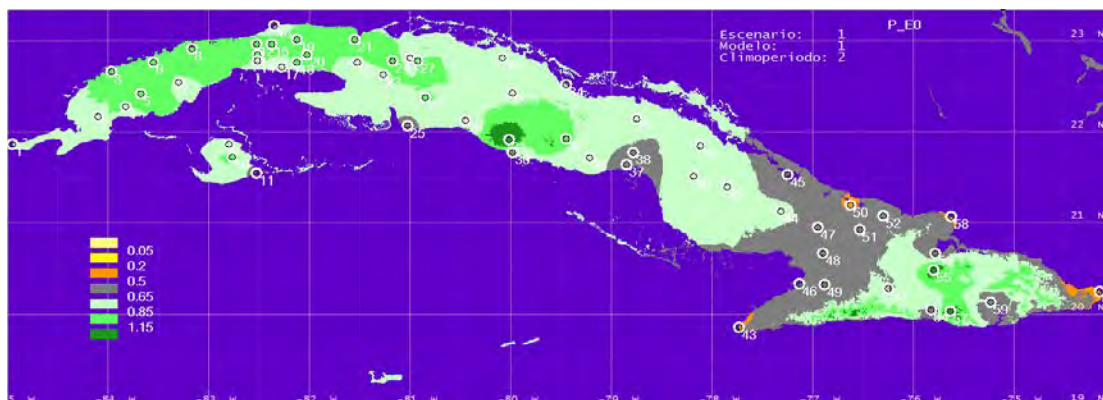


Figura 5.3.8. Índice de aridez del PNUMA (K) en el escenario ECHAM4 SRES A2 para el período 2036-2065.

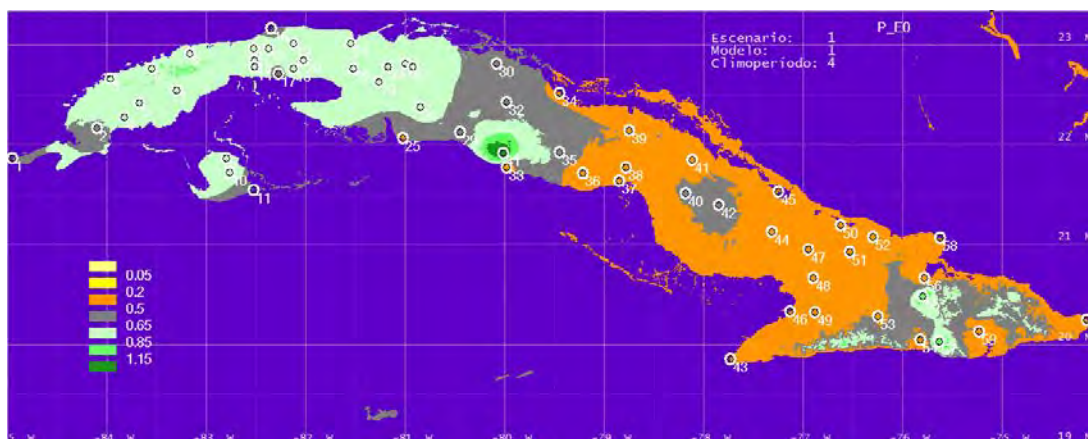


Figura 5.3.9. Índice de aridez del PNUMA (K) en el escenario ECHAM4 SRES A2 para el período 2086-2115.

Todas las áreas con Índice de Aridez inferiores a 0.65 y 0.50, de color gris y naranja en los mapas, corresponden a climas subhúmedos secos y semiáridos susceptibles de desertificación. Este proceso de aridización estará acompañado de una reducción paulatina de la productividad primaria neta y de la densidad potencial de biomasa de los ecosistemas, aún en presencia del efecto de fertilización por dióxido de carbono (Rivero y Rivero, 2011b).

La evolución prevista del clima de Cuba en los escenarios estudiados ocasionará una reducción progresiva de los rendimientos agrícolas potenciales, de riego y de secano (Rivero *et al.*, 2012), disminuyendo simultáneamente el potencial hídrico y la disponibilidad de agua para el regadío.

3.4. Bibliografía

1. Centella A., T. Gutiérrez, M. Limia and R. Rivero-Jaspe, (1999) Climate Change scenarios for impact studies in Cuba. *Climate Research*, 12, 223-230.
2. Centella A, A. Bezanilla and K. Leslie, (2008) A Study of the Uncertainty in Future Caribbean Climate Using the PRECIS Regional Climate Model. Technical Report, Community Caribbean Climate Change Center, Belmopan, 16pp.
3. Centella A, A. Bezanilla, I Borrajero, D. Martínez (2009) Escenarios Climáticos de Alta Resolución para la región de los Mares Interamericanos utilizando el Modelo PRECIS. Informe técnico de resultado científico, Programa Ramal de Ciencia y Técnica, Instituto de Meteorología y Agencia de Medio Ambiente, Habana, Cuba, 53pp.
4. Gordon, C., C. Cooper, C. A. Senior, H. Banks, J. M. Gregory, T. C. Johns, J. F. B. Mitchell and R. A. Wood, (2000) The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Clim. Dyn.*, 16:147-168.
5. Hulme, M., T.M.L. Wigley, E.M. Barrow, S.C.B. Raper, A. Centella, S. Smith and A.C. Chipanshi, (2000) Using a Climate Scenario Generator for Vulnerability and Adaptation Assessments: MAGICC and SCENGEN Version 2.4 Workbook, Climatic Research Unit, Norwich, UK, 52 pp.

6. Jones R. G., Noger M., Hassell D. C., Hudson D., Wilson S., Jenkins G., and Mitchell, J., (2004) Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS. Met Office Hadley Center, Exeter, UK, 40 pp.
7. Mearns, L.O., F. Giorgi, P. Whetton, D. Pabon, M. Hulme and M. Lal, (2003) Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Regional Climate Model Experiments, IPCC Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Analysis, 38 pp.
8. Mitchell TD, (2003) Pattern scaling: an examination of the accuracy of the technique for describing future climates. *Clim Change* 60: 217–242.
9. Taylor, M. A., Centella, A., Charlery, J., Borrajerro, I., Bezanilla, A., Campbell, J. D., *et al.* (2007) Glimpses of the future: A briefing from the PRECIS Caribbean climate change project, Caribbean Community Climate Change Centre, Belmopan, Belize. 24 pp.
10. Wigley, T.M.L. y Raper, S.C.B., (1992) Implications for climate and sea level of revised IPCC emissions scenarios. *Nature* 357, 293-300.
11. Wilby, R.L, S.P. Charles, E. Zorita, B. Timbal, P. Whetton and L.O. Mearns, (2004) Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Statistical Downscaling Methods, IPCC Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Analysis, 27 pp.

CAPÍTULO 4. RECURSOS HÍDRICOS

4.1 Metodología de trabajo

Modelo de potencial hídrico para la Agricultura:

Una evaluación de impactos sobre rendimientos potenciales de cultivo (de regadío) resultaría solo parcial si no se lleva a cabo una evaluación paralela del impacto de los cambios climáticos sobre los recursos hídricos y la disponibilidad de agua de regadío. El modelo de climatología física utilizado representa el balance hídrico multianual mediante la ecuación de balance: $P=E+S$, donde P : total anual de precipitaciones (mm); E : evapotranspiración real anual (mm) y S : escurrimiento anual (mm)

Dado que la variable S representa el total anual del agua precipitada que puede potencialmente ser cosechada para fines de riego y otros tipos de consumo, es considerada como potencial hídrico. Así que tanto las expresiones escurrimiento anual como potencial hídrico representan lo mismo en este contexto (Rivero, 2008a; Rivero *et al.*, 2009a; Rivero y Rivero, 2010a). La solución de esta ecuación requiere de la estimación de toda una serie de variables físicas intermedias. En este caso se utilizó la más simple de las metodologías conocidas, debida originalmente a Budyko, a saber:

Cálculo del balance anual de radiación (R_0) en Kcal/cm² - año a partir de la expresión,

$$R_0 = 3.65 T , \text{ con } T : \text{ temperatura media anual en grados Celsius}$$

Cálculo del índice radiativo de aridez (B) según,

$$B = 10 R_0 / (L P)$$

P : precipitación anual en milímetros

$L = 0.59$ – calor latente de condensación del vapor de agua (Kcal / g)

Si hacemos la aproximación siguiente,

$$E_0 = 10 R_0 / L$$

Donde E_0 es la evapotranspiración potencial de referencia en milímetros, resulta entonces que el índice radiativo de aridez no es más que el cociente entre la evapotranspiración potencial anual y las precipitaciones. Conocido el valor de B la evapotranspiración real anual E es calculada como:

$$E = P \{B [1 - \cosh (B) + \sinh (B)] \tanh (1/B)\}^{1/2}$$

Tras lo cual el potencial hídrico S es calculado como el residuo de la expresión original,

$$S = P - E$$

Esta metodología simple ha sido utilizada por los autores en la Primera Comunicación Nacional (Rivero *et al.*, 1999a; INSMET, 2001) y en evaluaciones posteriores (Rivero *et al.*, 2005b). Dividiendo la ecuación de balance hídrico multianual por E_0 se obtiene una ecuación en índices climáticos dada como:

$$K = M + \Phi$$

Donde: K : índice de aridez del PNUMA y sequía atmosférica (CCD, 1995);

M : índice ecológico de aridez definido por Rivero (1999) y Φ : índice de aridez hidrológica definido por Rivero *et al.* (2009a)

La interpretación racional de estos tres índices (Rivero *et al.*, 2009a) puede ser suficiente para una evaluación de impacto del cambio climático sobre el sector agrícola aún sin realizar las simulaciones biofísicas mediante modelos de cultivo.

4.2. Comportamiento y tendencias de la hidrología en 1961-1990.

Con una longitud de unos 120 Km. y una anchura promedio de unos 25 Km. la cuenca Costera Sur y más específicamente el tramo Güira-Quivicán (Cuenca Sur Centro) es la cuenca subterránea más importante de las actuales provincias Artemisa y Mayabeque y una de las zonas más importantes del país desde el punto de vista acuífero. En su territorio pueden apreciar algunos ríos pequeños entre los que se destaca el Mayabeque.

La composición litológica de las rocas de esta región, representada por varias formaciones geológicas miocénicas carbonatadas; los factores activos de formación del carso, el nivel de fluctuación de las aguas en la zona freática como resultado de las variaciones neotectónicas y glacieustáticas, han propiciado el desarrollo de un relieve típico de llanura erosiva denudativa, caracterizado por la presencia de diversas formas de tipo exo y endocársicas, lo cual, unido con la existencia de un suelo ferralítico muy permeable hace que el drenaje superficial sea muy pobre predominando el escurrimiento subterráneo. Estas características son muy visibles en la parte norte de la Cuenca, ya que en la parte sur, cercana a la faja costera, los espesores de arcilla dificultan la infiltración de las precipitaciones aunque en esta zona la acumulación y circulación del agua subterránea es considerable. Así se tiene que entre los pueblos de Artemisa y Batabanó, ningún río llega al mar de manera superficial, pues los mismos son capturados por cavidades cársicas y a partir de entonces su recorrido es subterráneo.

El espesor del acuífero en las calizas miocénicas es muy variable dependiendo de que se considere en la zona norte de la cuenca o la franja costera, pudiendo alcanzar entre 20 y 170 m. En algunos puntos, perforaciones de hasta 200 m no han logrado alcanzar el “piso” impermeable que sirve de base a las calizas cársicas del mioceno. Se ha calculado un promedio para el coeficiente de filtración de 150 m/d.

El área de estudio es un acuífero libre con estructura simple y drenaje unilateral abierto. Está enmarcada en una llanura cársica, donde se produce tanto la alimentación, como la circulación de las aguas subterráneas. Las aguas subterráneas dulces se encuentran en estrecha relación hidráulica e hidroquímica con las aguas del mar que bañan la costa sur de las provincias Artemisa y Mayabeque. A esa estrecha relación se debe el problema fundamental que presenta la cuenca sur, la intrusión salina, agravada en gran medida por la sobreexplotación en algunas partes de la franja costera en la década de 1980 y por el drenaje que se produce a través de canales superficiales en la parte central de la cuenca, los cuales facilitan el flujo tierra adentro de las aguas saladas.

Ya en la década de los años 1970 surgía la necesidad de realizar determinadas acciones que permitan mejorar esta situación, por lo que se planeó desde entonces la construcción del Dique Sur y el canal Pedroso-Mampostón-Güira. El primero, se ejecutó entre 1985 y 1992 y; el segundo desde 1976 hasta 1986, con el objetivo de trasvasar importantes volúmenes de agua a esta cuenca, disminuir el bombeo intensivo de pozos y, por consiguiente, contrarrestar la salinización del acuífero.

El Dique Sur de La Habana es una obra hidráulica de gran dimensión, concebida con fines de recarga para el mejoramiento de la calidad del agua del acuífero, única de su tipo en Cuba y una de las pocas existentes en el mundo, en su género. Según González Báez (1997), “el dique o presa costera es uno de los procedimientos menos utilizados hasta el momento para recargar agua dulce a un acuífero intrusionado”. Está conformado esencialmente por un terraplén construido paralelo a la costa, a una distancia promedio de 500 m; perpendicularmente a este se construyeron 50 km. de accesos para un total de 100 km de terraplenes construidos utilizando arcillas rojas en la base y capas de mejoramiento debidamente compactadas en la parte superior (corona). La base del terraplén se apoya sobre los espesores de turba que yacen en la zona pantanosa. La obra posee un ancho máximo de 8 m, con cotas topográficas entre 1,0 y 1,5 m sobre el nivel medio del mar, y a distancias entre 1 y 1,5 km. se construyeron vertedores (con cotas topográficas entre 0.7 y 0.9 m) para drenar los excedentes de agua del embalse, fundamentalmente de origen subterráneo, que al restringirse su salida por el cierre de los canales, se elevan y afloran superficialmente, formando un embalse aguas arriba. Por estudios de la composición hidroquímica de esta agua, se ha podido comprobar que estas se encuentran mezcladas frecuentemente con agua de lluvia proveniente de las precipitaciones locales. En conjunto, la capacidad de evacuación de los vertedores en período de intensas lluvias se estima en 200 m³/s.

Las variaciones del nivel de agua subterránea en la costera están determinadas por el régimen de precipitación y la explotación. Para las zonas altas al norte de la costera los niveles varían entre 25 y 40 metros y en las zonas cercanas a la faja costera van desde 2 hasta 8 m.

Los recursos evaluados ascienden a 375 Hm³ con los nuevos límites hidrogeológicos, (Artemisa-Quivicán), y de 236 Hm³ en el antiguo tramo Sur Centro, siendo los principales usos, el abasto a la población, el riego y en menor cuantía las industrias. Es de señalar que en los controles disponibles, en el año de mayor explotación la misma alcanzó 300 Hm³, correspondiendo más de 200 Hm³ para el área de Sur Centro, donde históricamente se han presentado problemas de intrusión marina.

El sector más explotado es el correspondiente a Güira-Quivicán, el cual mantiene una explotación de 100 Mm³/año en el Acueducto Cuenca Sur, que abastece a La Habana, lo que unido con el riego de la agricultura cañera y cultivos varios (otros 100 Hm³), más las industrias y los acueductos de algunas poblaciones de Artemisa y Mayabeque, hace que se extraiga, según estimados, un 70% de todos los recursos del acuífero. La deficiencia principal es que no hay un riguroso control de la explotación en las actividades del riego, agricultura en general e industrias.

La red de drenaje superficial es prácticamente inexistente en el tramo Güira-Quivicán dadas las características del suelo y del substrato, por lo que prácticamente toda el agua que cae en ella se infiltra o se evapotranspira. El drenaje subterráneo, muy potente, está orientado preferentemente de norte a sur, descargando en el Golfo de Batabanó mediante canales que se encuentran a lo largo de la costa (Figura 4.1).

Debido al gran desarrollo cársico que presenta la región, la existencia de un suelo ferralítico muy permeable y al pobre drenaje superficial, el mecanismo de alimentación fundamental de las aguas subterráneas vendrá dado por la infiltración directa de las precipitaciones, de aquí que la misma esté condicionada por el régimen de lluvia. Esta

última se produce fundamentalmente durante los meses húmedos del año, donde pueden presentarse eventos extraordinarios como ciclones tropicales que proporcionan abundantes precipitaciones o sequías continuadas, las cuales limitan grandemente la disponibilidad del recurso.

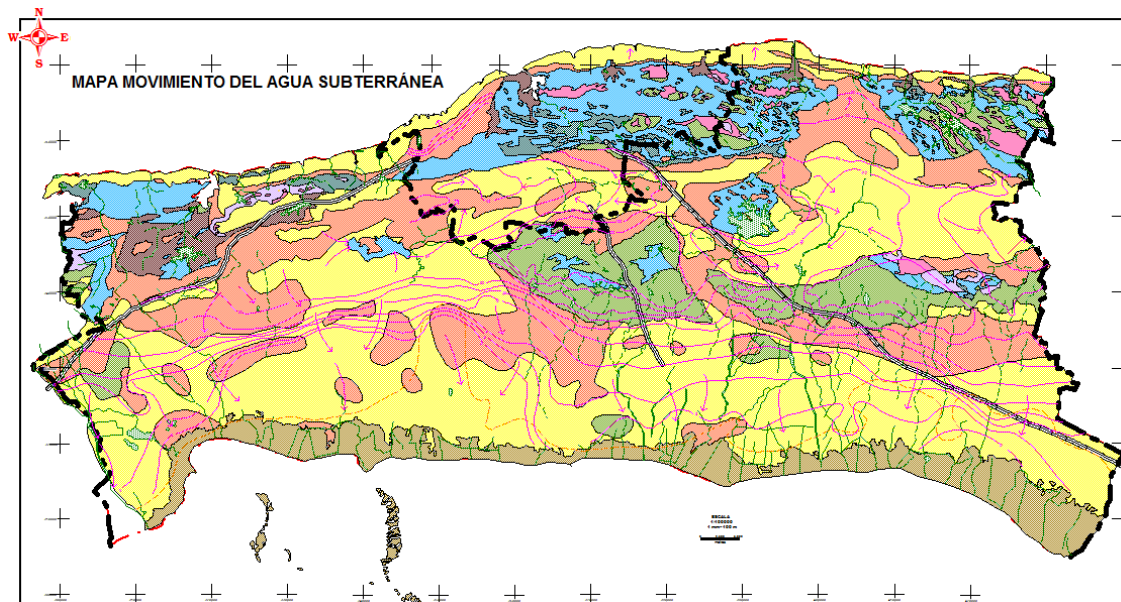


Figura 4.1. Mapa de Movimiento del agua subterránea en las provincias, Artemisa, La Habana y Mayabeque.

Por su origen, son aguas de infiltración, con profundidades de yacencia que aumentan gradualmente de la zona costera hacia el interior. En la zona costera, los niveles se encuentran entre 0 y 1 m; entre 1 y 30 m en la llanura y de 30 a 50 m en la parte norte.

Se han observado elevaciones locales de la superficie del agua en forma de cúpulas que están directamente relacionadas con las heterogeneidades del acuífero y con la hidrodinámica del flujo de las aguas subterráneas dulces (Figura 4.2).

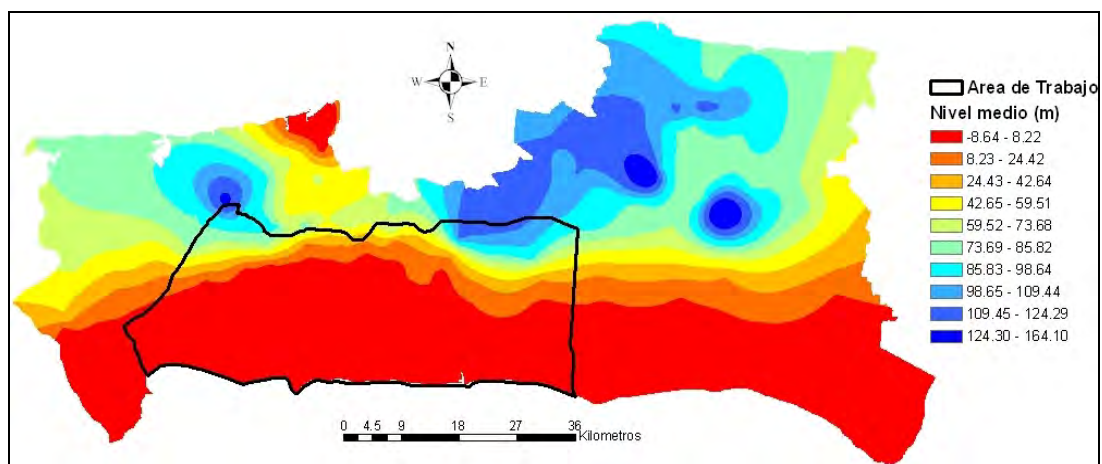


Figura 4.2. Mapa de niveles medios anuales del agua subterránea.

La descarga de las aguas subterráneas en la cuenca, hacia el mar, se produce en forma de escurrimiento a través de las estructuras intensamente carsificadas y fracturadas; también por el flujo o escurrimiento superficial a través de los aliviaderos o vertedores del Dique Sur; por la evaporación del agua embalsada por el propio dique y por la explotación de los pozos de riego y de los acueductos de la zona.

El elevado grado de fisuración, agrietamiento y cavernosidad de las calizas del acuífero, le otorgan una elevada porosidad efectiva, lo cual condiciona que la relación entre la lámina de Lluvia Efectiva Anual y de Lluvia Media Anual adquiera un valor elevado del orden de 0.79, indicando que el 78.9% de las precipitaciones anuales se infiltran en el acuífero. Los trabajos geofísicos ejecutados en pozos en zonas cársicas costeras de Cuba, indican que la velocidad de circulación de las aguas es mayor entre los primeros 15 a 40 m de profundidad del acuífero, pudiendo alcanzar hasta 20 m/d y aún valores superiores.

Estas propiedades hidrogeológicas del acuífero propician que se obtenga un elevado rendimiento en los pozos que se perforan en la zona, del orden de 100-300 l/s, con muy poco abatimiento (entre menos de 1 m y hasta 2 o 3 m), por lo que el rendimiento de la formación acuífera es alto y, por consiguiente también es alto el módulo de Escurrimiento Subterráneo (15 l/s/Km²). En los depósitos carbonatados de la cuenca, en general, la transmisibilidad varía entre 5000 y 50000 m²/d, variación ésta, determinada por el grado de carsificación. Por último, las propiedades anteriores determinan elevados valores del Recurso Pronóstico (Figura 4.3).

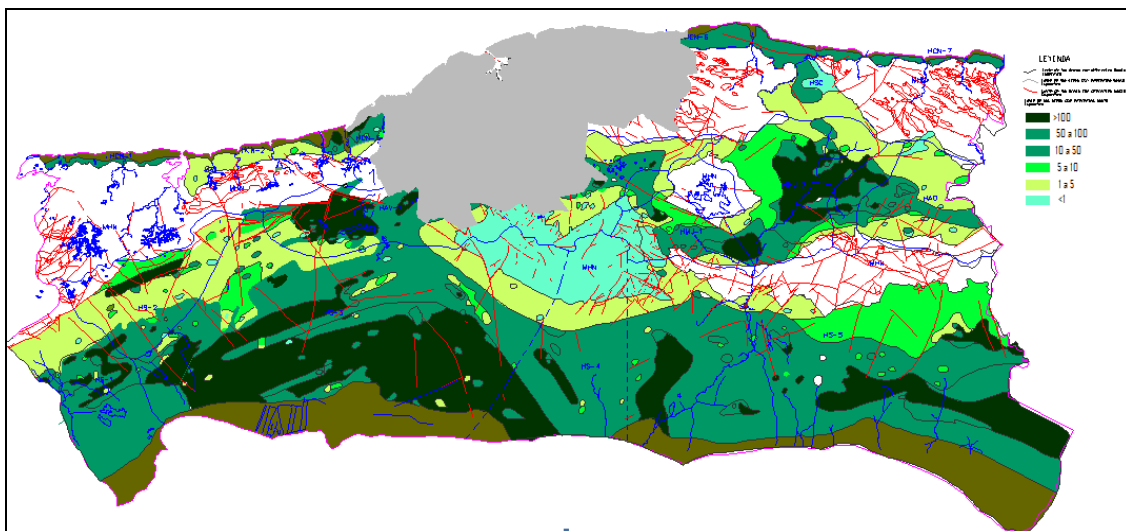


Figura 4.3. Mapa de Escurrimiento Específico de las provincias Artemisa y Mayabeque.

Un aspecto fundamental que caracteriza y controla la hidrogeología del área de estudio es la existencia de una zona de humedal colindante, que se extiende a lo largo de toda la costa, con un ancho entre 2 y 5 Km., perteneciente a la Ciénaga de Batabanó.

Los niveles de explotación del acuífero ($3.2 \text{ m}^3/\text{s}$, para abasto y $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$, para riego, junto a la construcción de canales de drenaje durante 80 años del siglo XX (para mejoramiento de suelos y extracción de mangrove), así como la disminución de las precipitaciones en la región en las últimas décadas, provocaron la modificación de las características naturales del humedal. A pesar del buen drenaje de los suelos, el alto grado de carsificación de las rocas, así como la gran transmisividad del acuífero, también se produjo un déficit de recursos hídricos en este sector de la cuenca, causando un descenso de la carga de agua dulce en el acuífero y, por consiguiente, el avance de la intrusión marina varios kilómetros tierra adentro (Figura 4.4).

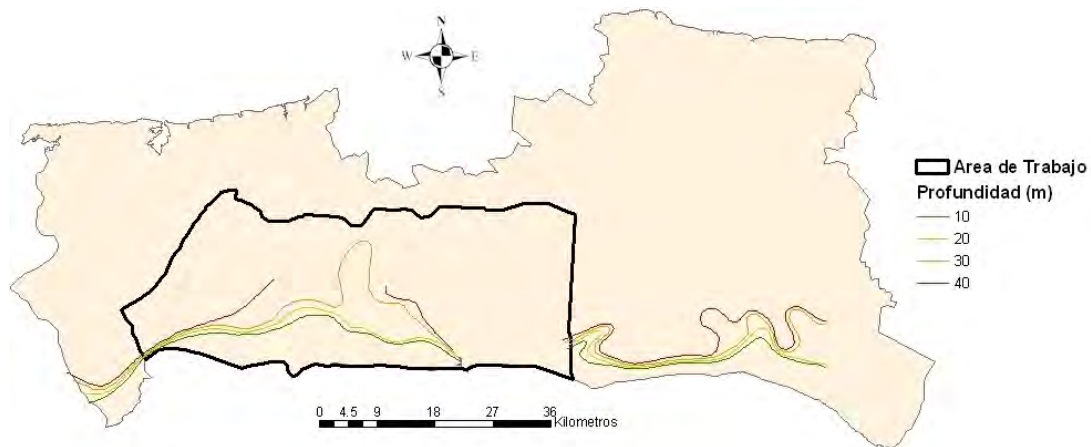


Figura 4.4. Mapa de curvas de 1 g/l SST a 10, 20, 30 y 40 m de profundidad.

Lo anterior ha hecho que, a pesar de la dirección preferencial norte a sur del flujo en la región, exista una distorsión de las hidroisohipsas en dirección al campo de pozos para abasto, donde el bombeo sea por debajo de la cota cero; lo que provoca el ascenso en la vertical de la interfase agua dulce-agua de mar. Esto se refleja en la calidad de las aguas subterráneas, con una evolución hidrogeoquímica que muestra diferentes tipos de aguas, que van desde aquellas que no han sufrido ninguna influencia de la intrusión marina, del tipo bicarbonatadas cálcicas, con composición semejante a las aguas de los acuíferos interiores (lejos de la costa), cuya composición responde a la litología, y que constituyen el nivel base del acuífero, a aguas del tipo clorurada sódica a través de aguas de mezcla del tipo bicarbonatada clorurada cálcica sódicas, a medida que se avanza hacia al sur o en profundidad.

Debido al relieve litoral de pendientes suaves y la carencia de una red hidrográfica con suficiente capacidad de evacuación de los gastos máximos que se producen en la temporada ciclónica, ocurren inundaciones que unido a la textura pesada de los suelos (arcillas, suelos arcillosos) dificultan la infiltración del agua de lluvia y favorecen su estancamiento prolongado en la superficie.

Se puede plantear que existe un 45.7% de las áreas cultivadas con problemas de inundación, drenaje y salinidad. De estas, las mayores afectaciones ocurren en las tierras inundadas por lluvias ciclónicas y con drenaje interno deficiente mientras que las menores afectaciones se deben a la salinidad con 3.1% y a las inundaciones por lluvias normales, también con un 3.1%. Existen 51251 ha de ciénagas, las cuales no están

incluidas en las cifras anteriores. Adicionalmente existen 1532 ha afectadas por lluvias extraordinarias en áreas no agrícolas con desarrollo urbano e industrial.

Respecto al tratamiento de los residuales, el volumen tratado se realiza mayormente a través de lagunas de estabilización. El volumen de residual no tratado recibe un tratamiento primario con fosas y tanques sépticos, los cuales no se consideran como depuradores de residual. Los sitios de vertimiento o de evacuación de estos residuales están constituidos por pozos o zanjas de infiltración al manto freático y, en muy pocos casos, por corrientes superficiales. En otros casos, el residual se vierte directamente al mar, como ocurre con el del pueblo de Alquizar, contando este con un emisario de 8.5 Km de longitud. Actualmente no se considera la utilización de estos residuales con fines de riego.

Se puede afirmar que la actividad de alcantarillado es aún muy deficiente en la zona, no solo por la cantidad de habitantes que carecen de este servicio, sino por el mal estado en que se encuentran muchas de las redes existentes, debido a deficiencias constructivas y a la falta de mantenimiento adecuado.

En el análisis del comportamiento salino realizado en el perfil de pozos de muestreo hidroquímico vertical, que va desde la línea de costa hasta una distancia de 9 Km. de la costa, es posible apreciar, en mayor o menor grado, un incremento del espesor de agua dulce y por tanto del volumen de agua útil. Este aumento está condicionado por la superposición de varios factores: el Dique Sur; el canal Pedroso-Güira, que disminuye la extracción de aguas subterráneas; al cese del bombeo de pozos por falta de combustible en la década de 1990 y; en los últimos años, a los acumulados de precipitación que están en los niveles medios históricos. Se puede afirmar con seguridad, que hasta una distancia de 6 a 7 Km. El Dique Sur ejerce un efecto directo que aminora la salinidad, por el aumento de la carga hidráulica; además, en estas áreas, lejos de haber menos explotación de aguas subterráneas, se conoce por información directa de la zona, que se explotan volúmenes que hasta ahora no podían utilizarse, manteniéndose un régimen estabilizado o incrementado, en cantidad y calidad.

La composición química de las aguas en los diferentes puntos de la red de muestreo en el año 2008 describe una línea de mezcla imaginaria que une a los extremos agua dulce (0) y agua de mar (9), pasando de bicarbonatada cálcica, a clorurada sódica, a través de facies intermedias de mezcla tales como: bicarbonatada clorurada cálcica sódica, bicarbonatada cálcica sódica, bicarbonatada clorurada cálcica y otras combinaciones más que demuestran la diversidad de los procesos geoquímicos que están ocurriendo producto a la mezcla agua dulce-agua de mar (Figura 4.5).

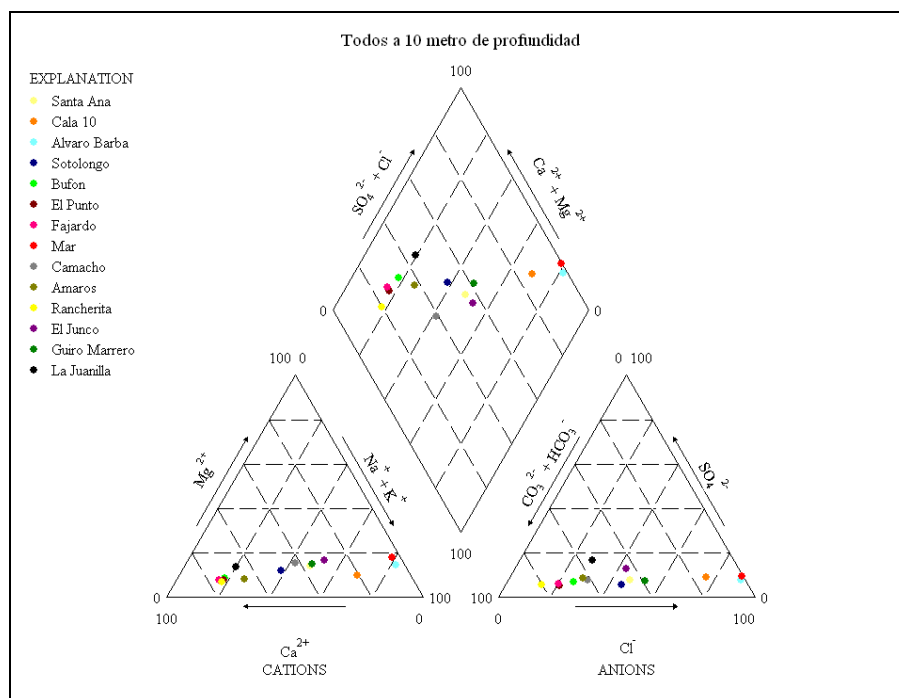


Figura 4.5. Diagrama de Piper-Hill-Langelier sector hidrogeológico HS-3 de la Cuenca Sur de la Habana.

4.2. Escenarios hidrológicos para 2050 y 2100.

Basado en la referencia histórica de la línea base del comportamiento de las variables del ciclo hidrológico para el período comprendido entre 1961 y 1990; así como las proyecciones futuras de la precipitación y la temperatura obtenidas de los modelos climáticos *ECHAM4* y *HadAM3P* para los escenarios de emisión *SRES A2* y *SRES B2*; se realizó una evaluación de posibles impactos del cambio climático en los recursos hídricos superficiales, apoyada en el balance hídrico resumen para la línea base y para los períodos 2021 - 2050 y 2071 - 2100. Los valores de los componentes de la ecuación general de balance utilizada se muestran en las tablas 4.1 a 4.3, donde además se incluyen los estimados de precipitación para la temporada mayo - octubre en cada uno de los citados períodos.

El volumen potencial de recurso obtenido

Tabla 4.1. Balance hídrico anual y precipitación en el período húmedo. Línea base 1961 - 1990

Variable	Lámina (mm)
P (anual)	1322
P (p. húmedo)	1034
E	1736
ETP	1048
Q	274
W	425

Donde:

- *P*: Lámina de precipitación (mm) calculada por el método de las isoyetas (datos de la Red Básica Nacional).
- *T*: Temperatura
- *ETP*: Lámina de evapotranspiración real (mm), obtenida por la Fórmula de Turc (Sokolov y Chapman, 1981).
- *E*: Lámina de evaporación potencial (mm), Fórmula de Turc (Sokolov y Chapman, 1981)
- *Q*: Lámina de escurrimiento (mm) obtenida por ecuación de balance hídrico.
- *W*: Volumen potencial de recursos hídricos (Hm^3).

para la línea base es ligeramente inferior al potencial hídrico de 440 Hm³, considerado tradicionalmente como referencia histórica para ciertos análisis y proyecciones en la zona de estudio.

Tabla 4.2. Balance hídrico anual y precipitación en el período húmedo según Modelo ECHAM4.

	SRESA2		SRESB2	
	2050	2100	2050	2100
P (anual)	1308	1124	1169	1089
P (p. húmedo)	1104	993	1030	944
E	1901	2218	1908	2082
ETP	1073	1000	994	963
Q	234	124	175	126
W	363	192	271	196

Tabla 4.3. Balance hídrico anual y precipitación en el período húmedo según Modelo HadAM3P.

	SRESA2		SRESB2	
	2050	2100	2050	2100
P (anual)	1258	1146	1265	1228
P (p. húmedo)	960	833	944	850
E	1887	2199	1890	2072
ETP	1042	1012	1048	1053
Q	215	134	216	175
W	334	208	336	272

La valoración de los impactos sobre los recursos hídricos subterráneos se realizó con el escenario de emisión de gases de efecto invernadero IS92a para el año 2050. Para este escenario hay tres posibles valores de aumento del nivel medio del mar dependiendo de la sensibilidad climática. Se consideró conveniente utilizar los pronósticos correspondientes a las sensibilidades media (aumento del nivel medio del mar de 23.3 cm) y alta (aumento del nivel medio del mar de 44.4 cm). Para determinar cuánto se trasladará la línea de la costa tierra adentro en este escenario, se asumió que las cotas de los aliviaderos del Dique Sur habrán descendido hasta los 0.50 m, suponiendo que a lo largo de los años el material soportante así como el material de relleno del dique se han asentado y que las cotas originales de la corona y los aliviaderos han descendido.

La evaluación de la respuesta del acuífero ante los posibles escenarios de eventos extremos, se tomaron los valores de lluvia para los ocho trimestres comprendidos entre noviembre de 1983 y octubre de 1985, en el que las probabilidades de los acumulados anuales de precipitación reflejan comportamientos medio seco y muy seco. Por su parte, la explotación corresponde a la del año 2007 (97.58 hm³), que fue la menor en el período para el cual se dispone de datos de explotación del acueducto de Cuenca Sur (2002 – 2007).

4.3. Vulnerabilidades e impactos

4.3.1. Impactos en los recursos hídricos superficiales

Aun cuando no se observa coincidencia en los resultados de los modelos y en los estimados realizados sobre la base de éstos (salvo en el caso del modelo *HadAM3P* para el período 2071 - 2100), sí existe una tendencia general en la zona de estudio a la

merma en la disponibilidad de recursos hídricos, producto del efecto combinado del intenso calentamiento futuro y de la reducción de las precipitaciones. Por otra parte, tampoco existe una tendencia general en cuanto al comportamiento futuro de la precipitación en la temporada mayo - octubre en comparación con los acumulados anuales.

Según el modelo *ECHAM4* (Tabla 4.2), se observa, una disminución marcada en la precipitación de hasta un 12% para el período 2020 - 2050 y hasta un 18% para el período 2070 - 2100, ambas para el escenario de emisiones *SRES B2*. La disminución de los promedios de precipitación de conjunto con el aumento, también notable, de la evaporación potencial, provocaría que los recursos hídricos potenciales puedan verse reducidos hasta un 36% (*SRES B2*) para el 2050 y hasta un 55% para el 2100, a juzgar por *SRES A2*. Los acumulados de precipitación entre mayo y octubre para el horizonte 2050, tienden a aumentar en *SRES A2* y a la estabilidad en *SRES B2*. En el caso del período 2071 - 2100 la tendencia es a la disminución. Aun así, la precipitación en el período húmedo respecto al acumulado anual es superior en comparación con la línea base (78%), obteniéndose estimados de 84 y 88% respectivamente.

Para el caso del modelo *HadAM3P* (Tabla 4.3) se refleja una disminución progresiva en el tiempo tanto de los acumulados de precipitación y de la disponibilidad de recursos hídricos, aunque menos acentuada que en el modelo *HADCM2*, también influida por el aumento de la evaporación potencial. A diferencia del modelo *HADCM2*, los acumulados de precipitación para la temporada mayo - octubre no solo disminuyen en comparación con los de la línea base en ambos escenarios de emisión y horizontes de tiempo, sino que también disminuye en todos los casos la relación temporada húmeda - año, oscilando los valores entre el 69% y el 76%.