

## **NOTAS SOBRE EL CAMBIO DE CLIMA, EXTREMOS CLIMATICOS Y ADAPTACION CON REFERENCIA A URUGUAY**

**Profesor (Honorario) Ingeniero Civil Victor Sposito Acquistapace,  
Universidad ORT Uruguay, Deakin University, Australia**

**Académico (Correspondiente) Academia Nacional de Ingeniería del Uruguay**

### **1. INTRODUCCION – UN DESAFIO EXISTENCIAL PARA LA HUMANIDAD**

La magnitud del desafío que el cambio del clima presenta a la humanidad es ahora bien clara. Múltiples observaciones demuestran que los cambios climáticos y sus impactos están ocurriendo más rápidamente de lo que se esperaba. Existe una gran probabilidad de que el planeta Tierra se esté aproximando a, o haya ya superado, uno o más de los “tipping points” (umbrales) que pueden conducir a cambios irreversibles.

Los últimos informes del “Intergovernmental Panel on Climate Change” – IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio de Clima) confirman que el cambio de clima debido a las actividades antropogénicas es inequívoco y que las consecuencias y riesgos son muy serios. Se indica que la amplitud de los recientes cambios en el sistema climático, así como el estado actual de muchos aspectos de este, no tienen precedentes a lo largo de muchos siglos o miles de años. En relación con el futuro, se señala que la temperatura global en la superficie de la Tierra seguirá aumentando hasta, por lo menos, mediados del Siglo XXI. Se prevé que el aumento del calentamiento global entre 1,5°C y 2°C se superará durante las próximas décadas, a menos que se logren rápidamente grandes reducciones de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y de otros *gases del efecto de invernadero* (GEI) (IPCC, 2021a, 2021b, 2023). Ver *Apéndice 1 - Glosario de los principales términos y conceptos empleados en este artículo*.

La intensidad de los impactos del cambio del clima y extremos climáticos aumentan la vulnerabilidad de, y los riesgos en, los sistemas humanos y los sistemas naturales. Los daños a las ciudades e infraestructura, la disrupción de la producción agropecuaria y del suministro de agua potable y agua para usos industriales y riego, son algunos de los efectos más conocidos. Estos impactos son usualmente agravados por la falta de preparación para enfrentarlos por parte de los gobiernos y de las comunidades.

Uruguay es un signatario del *Acuerdo de París* en relación con el cambio del clima (ratificado por Uruguay en 2016 por Ley 19.439) cuyo propósito principal es “mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2°C con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5°C con respecto a los niveles preindustriales, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático.” (Artículo 2a, Naciones Unidas, 2015; online). Para limitar el calentamiento global a 1.5°C, las emisiones de los GEI deben alcanzar sus valores máximos en 2025 y declinar por 43% en el 2030. En consecuencia, para lograr este objetivo estratégico existe un imperativo urgente de reducir cuanto antes las emisiones de los GEI y de adaptación a los cambios climáticos.

Dado que las acciones de mitigación y las de adaptación son generalmente sinérgicas, cabe destacar entonces la importancia para Uruguay de aumentar la capacidad de adaptación y resiliencia de su sociedad, sistemas productivos y ecosistemas, y reducir la vulnerabilidad ante eventos climáticos adversos que serán cada vez más frecuentes. La adaptación es una prioridad nacional, por ser Uruguay un país particularmente vulnerable a los impactos del cambio climático (Medio Ambiente, SNRCCC, 2021, p. x).

Es el argumento de este artículo que las ‘soluciones’ basadas únicamente en enfoques técnico-económicos no son suficientes. Estos enfoques deben ser complementados con innovadoras perspectivas, metodologías y métodos formulados dentro del nuevo paradigma de “Systems Thinking” (Pensamiento Sistémico).

## **2. ESTADO DEL CLIMA Y POSIBLES CAMBIOS FUTUROS GLOBALES**

### **2.1. Cambios Observados en el Estado del Clima**

El clima de la Tierra ha cambiado en forma sustancial en tiempos geológicos de millones de años, pero lo que es actualmente de gran preocupación es que el clima ha mostrado un calentamiento global sin precedentes en las últimas décadas. Desde el comienzo de observaciones confiables en el Siglo XIX, científicos de muchos países han examinado en áreas locales, regiones y a escala global los promedios de las temperaturas del aire en la superficie de la tierra y en la superficie de los océanos empleando distintos métodos y, recientemente, datos de satélites.

De acuerdo con documentos del “Assesment Report Sixth” - AR6 (Sexto Informe de Evaluación) del IPCC Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio de Clima) (IPCC, 2021, IPCC 2023), las observaciones del estado del clima en la Tierra indican que:

1. El calentamiento rápido y generalizado de la atmósfera, el océano, la criosfera y la biosfera (la tierra) debido a las actividades humanas (antropogénicas) es inequívoco. Los aumentos observados en las concentraciones de los GEI desde alrededor del año 1750 están causados por las actividades humanas. Desde entonces, las concentraciones han seguido aumentando en la atmósfera y en 2024 alcanzaron medias anuales de 424,61 partes por millón (ppm) de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), 1921,86 partes por billón (ppb) de metano (CH<sub>4</sub>) y 337,69 ppb de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). A escala global, la tierra y el océano han absorbido una proporción casi constante.
2. La magnitud de los recientes cambios en el sistema climático en su conjunto, así como el estado actual de muchos aspectos del sistema climático, no tienen precedentes a lo largo de muchos siglos a muchos miles de años. Las concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub> son más altas que en cualquier momento en, al menos, 2 millones de años, y las concentraciones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O son más altas que en cualquier momento en, al menos, 800.000 años.
3. El cambio climático causado por las actividades humanas influye en muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos en todas las regiones del mundo. La frecuencia y la intensidad de los fenómenos extremos – como olas de calor, precipitaciones intensas, sequías y ciclones tropicales – han aumentado en la mayoría de las regiones terrestres desde la década del 1950, mientras que los fenómenos de frío extremo (incluidas las olas de frío) se han vuelto menos frecuentes e intensos.
4. Los cambios del clima, incluyendo eventos extremos más frecuentes e intensos, han causado extensos impactos adversos y daños a la naturaleza y personas, más allá de la vulnerabilidad natural. Los aumentos en los extremos climáticos ya han provocado algunos impactos irreversibles puesto que los sistemas naturales y humanos son impelidos más allá de su habilidad de adaptación.
5. La vulnerabilidad de los sistemas ecológicos (ecosistemas) y los seres humanos a los cambios climáticos difiere sustancialmente entre, y dentro, de las regiones, provocada por la intersección de distintos desarrollos socio-económicos, insostenibles usos de la tierra y los océanos, desigualdad y marginación, e inadecuadas acciones por los gobiernos. Aproximadamente 3.3 a 3.6 billones de personas viven en contextos que son altamente vulnerables a cambios climáticos. Una proporción importante de las especies naturales son también vulnerables. Las vulnerabilidades de los seres humanos y los ecosistemas son interdependientes. Las características del desarrollo global actual están aumentando la exposición de los ecosistemas y humanos a los riesgos del cambio del clima.

## 2.2. Posibles Cambios Futuros

Existe a menudo una confusión en relación con los términos empleados para caracterizar futuros cambios del clima: ‘predicciones’, ‘escenarios’ y ‘proyecciones’.

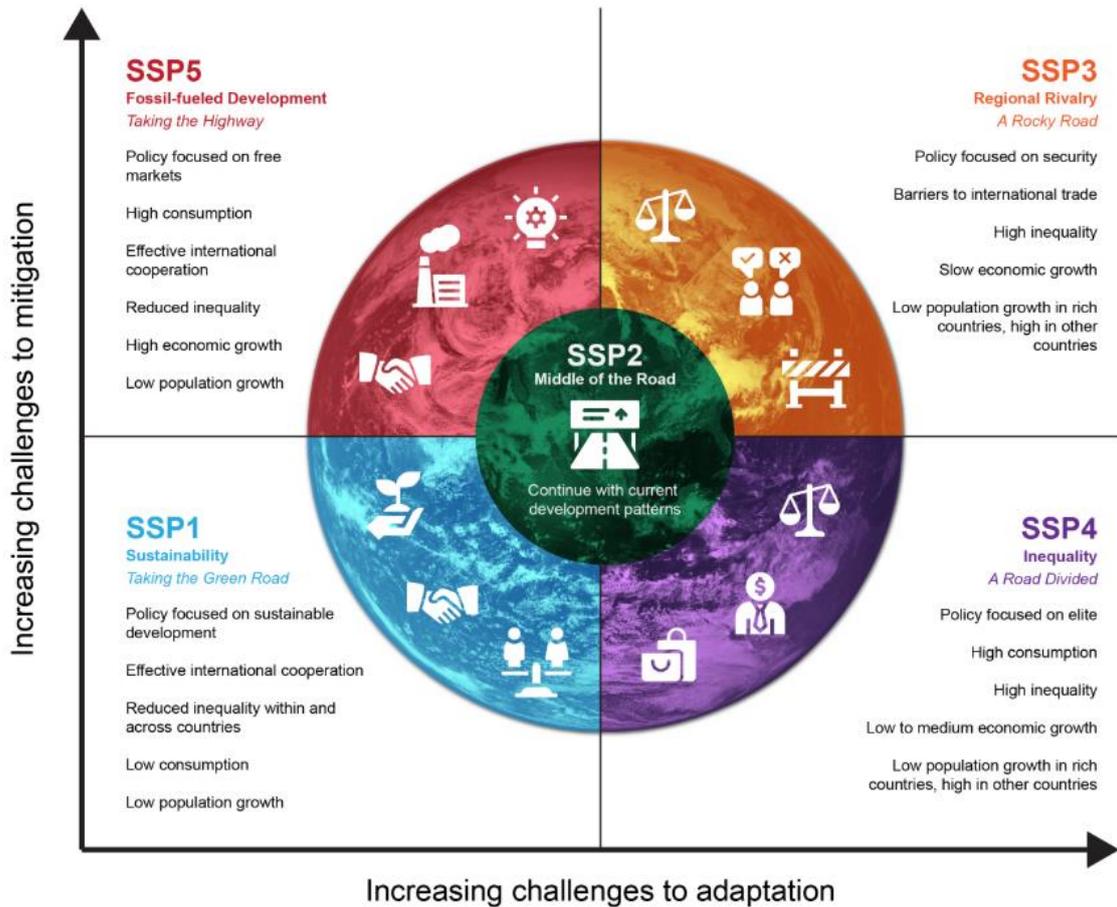
Una *predicción* es una indicación de que *algo va a ocurrir* en el futuro, basada en las condiciones existentes cuando se efectúa la predicción y suposiciones sobre los procesos físicos, u otros procesos, que provocan el cambio del clima. Generalmente, algunas predicciones no se cumplen porque las condiciones no se conocen en forma precisa y los procesos que afectan el futuro no son totalmente comprendidos. Las predicciones deben ser expresadas con una indicación de la probabilidad de que ocurran. Un *escenario* es una descripción plausible y frecuentemente simplificada de un estado futuro, sin indicación de su probabilidad. La descripción se basa en un conjunto consistente y coherente de supuestos sobre las fuerzas dinamizantes (o impulsoras) y sobre las relaciones más importantes. Los escenarios pueden estar basados en proyecciones, pero suelen basarse también en datos obtenidos de otras fuentes, acompañados en ocasiones de una descripción textual. Se utilizan para permitir explorar la pregunta: “¿Qué pasará si tal situación ocurre?”. Se emplean para informar y limitar las deliberaciones sobre el cambio del clima y las posibles mitigaciones y adaptaciones. Una *proyección* es una futura condición, o consecuencia, basada en suposiciones explícitas como escenarios, Aun para un determinado escenario, las proyecciones introducen nuevas incertidumbres debido al empleo de reglas o modelos inexactos que conectan las condiciones del escenario con los resultados proyectados. Las proyecciones climáticas, definidas por el IPCC, son las respuestas simuladas (modeladas) del sistema climático a diversos escenarios de emisiones, o de concentraciones de los GEI y aerosoles, basadas en simulaciones mediante modelos climáticos (Pittock, 2009, pp. 44-45).

### Escenarios usados por la IPCC

En las últimas tres décadas, el enfoque para formular distintos escenarios evolucionó de un centro en el clima a un centro en el desarrollo societal. Tanto los modelos climáticos como los escenarios de trayectorias recrean ahora, de la forma más precisa que la tecnología de vanguardia permite, las complejas interacciones del sistema terrestre.

El IPCC AR6 utiliza *Shared Socioeconomic Pathways* – SSPs (Trayectorias socioeconómicas compartidas). Los SSPs son narrativas/relatos (“storylines”) del cambio de clima que reflejan posibles desarrollos de la sociedad global y políticas hasta fines del Siglo XXI, de acuerdo con distintas suposiciones elaboradas por el IPCC. Las narrativas y sus denominaciones son: SSP1 “Sustainability” – Tomando la ruta verde (pocos desafíos para mitigación y adaptación); SSP2 “Middle of the Road” (medianos desafíos para mitigación y adaptación); SSP3 “Regional Rivalry” Un camino escabroso (grandes desafíos para mitigación y adaptación); SSP4 “Inequality” – Una ruta dividida (pocos desafíos para mitigación, grandes desafíos para adaptación); SSP5 “Fossil-fueled Development” – Tomando la carretera (grandes desafíos para mitigación, pocos desafíos para adaptación) (Riahi *et al.*, 2016). La **Figura 1** resume las principales características de los SSPs.

Cada uno de los relatos conduce a diferentes niveles del forzamiento radiativo (“radiative forces”) del cambio climático. Para identificar los escenarios se usan medidas de los efectos de los GEI en calentar, o enfriar, la atmosfera en watts por metro cuadrado ( $W/m^2$ ) alcanzados en el año 2100 - 1.9, 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5  $W/m^2$  de cambio desde los niveles preindustriales. Los valores más altos representan los calentamientos más extremos. La medida 1.9  $W/m^2$  se introdujo para reflejar el *Acuerdo de Paris* en relación con un aumento de la temperatura de 1.5°C. Las proyecciones climáticas se elaboran en base a conjuntos (“ensambles”) de modelos climáticos globales, diferentes escenarios de emisiones de GEI y variables socioeconómicas.

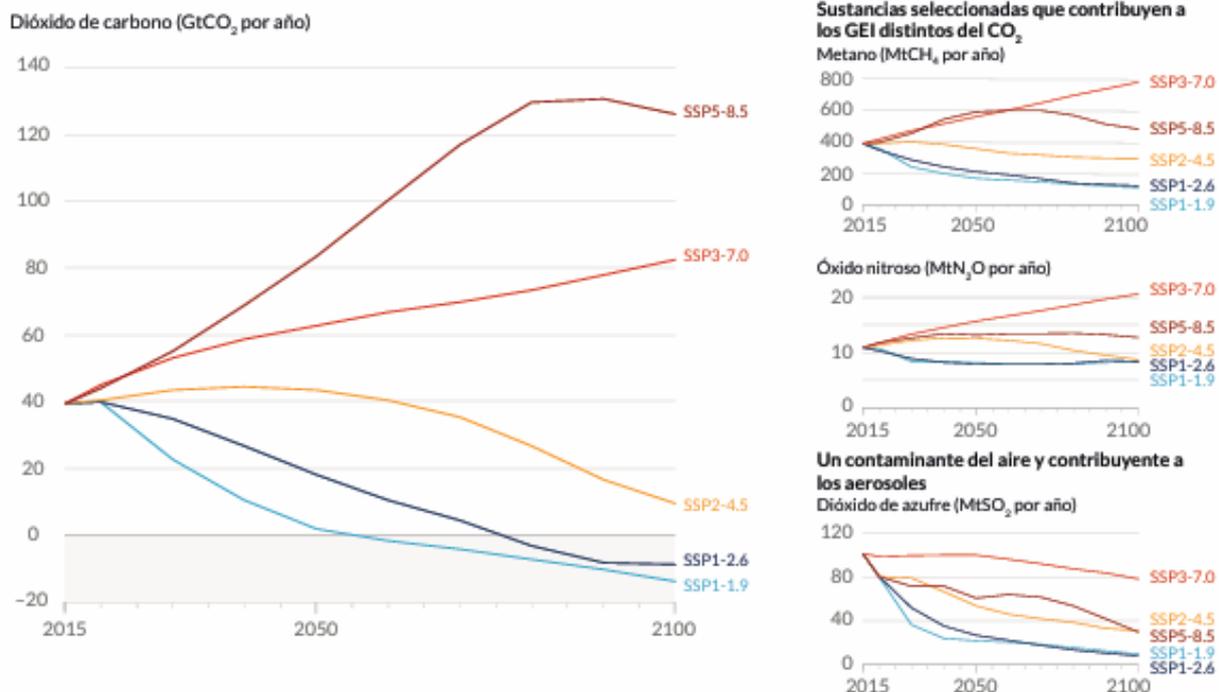


**Figura 1. Los cinco Shared Socioeconomic Pathways del IPCC.** Fuente: IPCC, 2021a.

En el IPCC AR6 se evalúa la respuesta climática en relación con cinco escenarios ilustrativos basados en los SSPs. Como muestran las **Figuras 2**, el abanico de las posibilidades comienza en el año 2015 e incluye escenarios con emisiones de los GEI altas y muy altas (*SSP3-7.0* y *SSP5-8.5*) y emisiones de CO<sub>2</sub> que prácticamente se duplican con respecto a los niveles actuales en el 2100 y 2050, respectivamente; escenarios con emisiones de los GEI intermedias (*SSP2-4.5*) y emisiones de CO<sub>2</sub> que se mantienen en torno a los niveles actuales hasta mediados de siglo; y escenarios con emisiones de los GEI muy bajas y bajas que disminuyen hasta llegar a emisiones netas iguales a cero en torno a 2050 o después de ese año, seguidas de niveles variables de emisiones netas negativas de CO<sub>2</sub> (*SSP1-1.9* y *SSP1-2.6*). Estos escenarios son ahora la referencia estándar para la consideración de los cambios climáticos, impactos, vulnerabilidades, mitigación y adaptación.

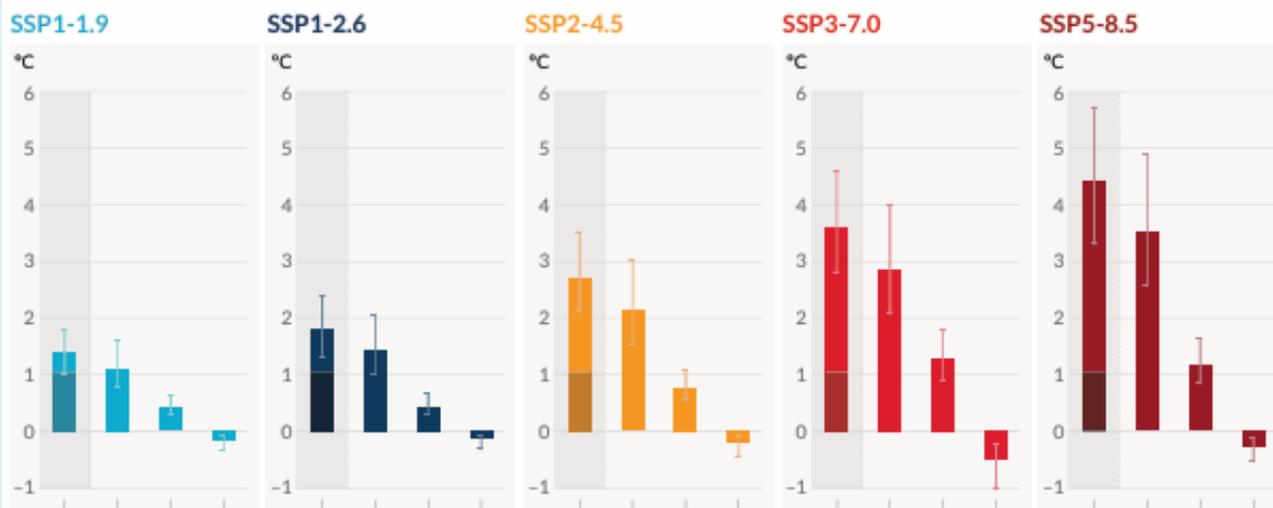
## Las emisiones futuras provocan un calentamiento adicional en el futuro, con un calentamiento total que obedece principalmente a las emisiones de CO<sub>2</sub> pasadas y futuras

(a) Emisiones anuales de CO<sub>2</sub> en el futuro (izquierda) y de un subconjunto de fuerzas impulsoras claves distintas del CO<sub>2</sub> (derecha), en los cinco escenarios ilustrativos



(b) Contribución al aumento de la temperatura global en superficie de diferentes emisiones, con un papel predominante de las emisiones de CO<sub>2</sub>

Cambio en la temperatura global en superficie en 2081–2100 con respecto al período 1850–1900 (°C)



**Figura 2(a).** Futuras emisiones antropogénicas de las principales fuerzas impulsoras del cambio climático y contribuciones al calentamiento por grupos de fuerzas impulsoras en los cinco escenarios principales. **Figura 2(b)** Contribuciones al calentamiento por grupos de fuerzas impulsoras y por escenario de acuerdo con el cambio de temperaturas globales en la superficie de la tierra. Fuente: IPCC, 2021b, pp. 14-15.

La **Tabla 1** muestra los cambios en la temperatura global en la superficie de la Tierra, evaluados sobre la base de diversas líneas de evidencia, para períodos de 20 años seleccionados (corto, mediano y largo plazo) y los cinco escenarios ilustrativos de las emisiones de los GEI considerados. Las diferencias de temperatura con respecto a la temperatura media global en superficie del período 1850–1900 se indican en °C. Los cambios relativos al reciente período de referencia 1995–2014 pueden calcularse aproximadamente restando 0,85°C, la mejor estimación del calentamiento observado desde 1850–1900 hasta 1995–2014 (IPCC, 2021b).

**Tabla 1. Cambios de la temperatura global en la superficie de la tierra en corto, mediano y largo plazo en los cinco IPCC escenarios ilustrativos.** Fuente: IPCC, 2023b, p. 15.

Escenario	Corto plazo, 2021–2040		Medio plazo, 2041–2060		Largo plazo, 2081–2100	
	Mejor estimación (°C)	Rango muy probable (°C)	Mejor estimación (°C)	Rango muy probable (°C)	Mejor estimación (°C)	Rango muy probable (°C)
SSP1-1.9	1,5	1,2 to 1,7	1,6	1,2 to 2,0	1,4	1,0 to 1,8
SSP1-2.6	1,5	1,2 to 1,8	1,7	1,3 to 2,2	1,8	1,3 to 2,4
SSP2-4.5	1,5	1,2 to 1,8	2,0	1,6 to 2,5	2,7	2,1 to 3,5
SSP3-7.0	1,5	1,2 to 1,8	2,1	1,7 to 2,6	3,6	2,8 to 4,6
SSP5-8.5	1,6	1,3 to 1,9	2,4	1,9 to 3,0	4,4	3,3 to 5,7

Basados en los cinco escenarios ilustrativos y otra información científica, el IPCC indica lo siguiente en relación con los posibles cambios futuros del clima (IPCC, 2021a, 2021b, 2023).

1. La temperatura global en la superficie de la Tierra seguirá aumentando hasta, por lo menos, mediados de siglo en todos los escenarios de emisiones considerados. El aumento del calentamiento global entre 1,5°C y 2°C se superará durante el Siglo XXI, a menos que se logren fuertes reducciones de las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros GEI en las próximas décadas.<sup>1</sup>
2. Muchos cambios en el sistema climático son mayores que el aumento del calentamiento global. Entre ellos se incluyen el incremento de la frecuencia y la intensidad de los eventos (o episodios) de calor extremo, las olas de calor marinas, las precipitaciones intensas y, en algunas regiones, las sequías agrícolas y ecológicas; un aumento de la proporción de ciclones tropicales intensos; y la reducción del hielo marino del Ártico, el manto de nieve y el permafrost.
3. Se prevé que el continuo calentamiento global intensificará aún más el ciclo hidrológico a escala global, incluida su variabilidad, las precipitaciones monzónicas globales y la gravedad de los fenómenos húmedos y secos.

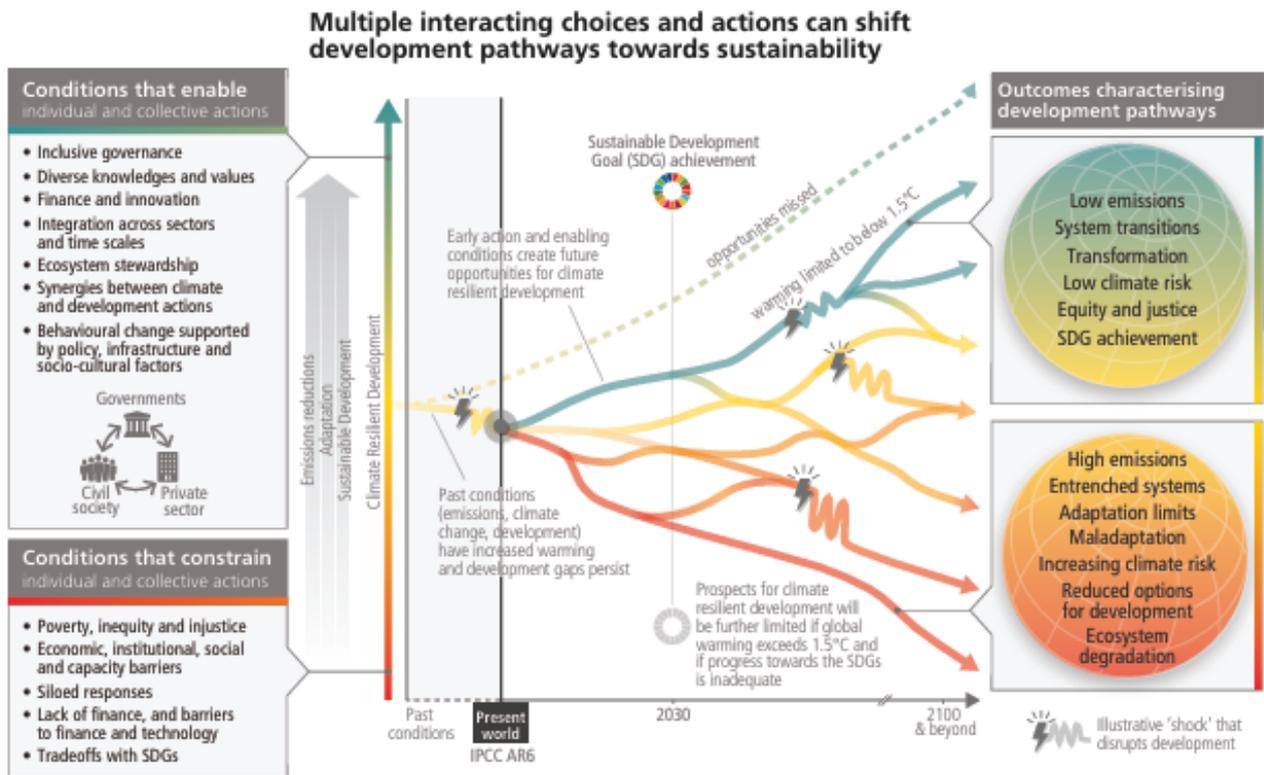
<sup>1</sup> De acuerdo con el Copernicus Climate Change Service (2024) y el Berkeley Earth Temperature Update (Rohde, 2024), Junio del 2024 fue la primera vez que la temperatura global promedio en la superficie de la Tierra alcanzó 1.5°C por encima de los niveles preindustriales durante doce meses consecutivos. Sin embargo, Rohde menciona que, aunque la temperatura esté por encima de los 1.5°C, ello no significa necesariamente que el Acuerdo de París haya sido transgredido ya que el mismo refiere al promedio de temperatura en un plazo largo. Además, IPCC AR6 evaluó el calentamiento global inducido por la actividad humana durante un periodo histórico de 20 años (ver Apéndice 1 - Glosario). En un artículo publicado en *Nature Climate Change* (10 de Febrero del 2025), el científico Alex Cannon para determinar precisamente la situación examinó las simulaciones utilizadas en estudios climáticos. Cannon concluyó que: “el análisis muestra que el aumento de la temperatura de 1.5°C por doce meses consecutivos, independientemente de las condiciones recientes de El Niño, ocurre usualmente después que el umbral de los 1.5°C establecidos por el Acuerdo de París ha sido transgredido en las simulaciones efectuadas”. Lo cual significa que el umbral del Acuerdo de París ya ha sido muy posiblemente excedido. Ver también Bevacqua *et al.*, 2025.

4. En los escenarios con un mayor aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> (SSP2-4.5, SSP3-7.0, y SSP5-8.5), se prevé que los sumideros de carbono terrestre y oceánicos naturales serán menos eficaces para frenar la acumulación de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Es decir, la proporción de emisiones absorbidas por la tierra y el océano disminuye con el aumento de las emisiones acumuladas de CO<sub>2</sub>. Esto dará lugar a una mayor proporción de CO<sub>2</sub> emitido que permanecerá en la atmósfera.
5. Muchos de los cambios debidos a las emisiones de los GEI pasadas y futuras serán irreversibles durante siglos o milenios; en especial, los cambios en los océanos, los mantos de hielo y el nivel del mar global.<sup>2</sup>
6. Las fuerzas impulsoras naturales y la variabilidad interna modularán los cambios provocados por el ser humano, especialmente a escala regional y a corto plazo (2041-2040), pero tendrán poco efecto sobre el calentamiento global a largo plazo (2081-2100). Es importante tener en cuenta estas modulaciones al planificar toda la gama de cambios posibles.
7. Con un mayor calentamiento global, se prevé que todas las regiones experimentarán cada vez más cambios simultáneos y diversos en las condiciones climáticas que conducen a impactos. Los cambios en varias de esas condiciones serían más generalizados con un aumento de 2°C, en comparación con un calentamiento global de 1,5 °C, e incluso más generalizados o pronunciados en niveles de calentamiento más elevados.

Sin embargo, como se muestra en la **Figura 3**, múltiples decisiones y acciones pueden modificar la futura trayectoria hacia sostenibilidad para todos y la realización de los Objetivos del Desarrollo Sostenible (United Nations, 2016). Las trayectorias (“pathways”) divergentes indican que las decisiones y acciones tomadas por los gobiernos, el sector privado y la sociedad civil pueden reducir las emisiones de los GEI. Empero, la ventana de oportunidades se está cerrando rápidamente. El tema de la próxima sección discute entonces posibles enfoques para modificar el curso actual.

---

<sup>2</sup> En un artículo recién publicado (3 de Febrero del 2025) Hansen *et al.* indican que el más peligroso “tipping point” (umbral) es el “Point of No Return” (Punto de No Retorno) el cual será excedido cuando sea imposible el evitar la pérdida catastrófica del manto de hielo del Antártico Oeste. Este extremo climático (ver Apéndice 1 – Glosario) provocará el aumento del nivel del mar en varios metros. Como consecuencia, grandes áreas en Bangladesh, China, USA y los Países Bajos, numerosas islas, y por lo menos la mitad de las metrópolis del mundo estarán posiblemente sumergidas - un resultado completamente irreversible. Además, el nivel del mar no se estabilizará, ya que hay por lo menos unos 15-25 metros en las capas de hielo de la Antártica y Groenlandia en contacto directo con los océanos. En tiempos históricos, la última vez en que la Tierra tenía una temperatura de 2°C por encima de los niveles preindustriales fue en el Pleistoceno y el nivel del mar era entonces 15-25 metros más alto que el nivel actual.



**Figura 3. Múltiples decisiones (“choices”) y acciones pueden mover las trayectorias (“pathways”) del desarrollo hacia la sostenibilidad (rojo a verde) y los resultados asociados con las emisiones (panel derecho).**

Fuente: IPCC, 2023a, p. 25.

### 3. CAMBIO DEL CLIMA – UN PROBLEMA COMPLEJO Y “WICKED” QUE REQUIERE SOLUCIONES HOLISTICAS

#### 3.1. Complejidad

Comúnmente se dice que el mundo en que vivimos exhibe características VICA – volatilidad, incertidumbre, complejidad y ambigüedad. Los mayores problemas de nuestro tiempo – medio ambiente/ecológicos, cambio del clima, energía, seguridad alimenticia y bienestar/salud - se han interconectado en una forma sin precedentes. Los eventos ‘black swans’ (cisnes negros / Únicos) son más frecuentes y hay menos valores comunes, basados en un consenso comunitario, que ayuden a enfrentar la complejidad. Indudablemente, la complejidad presenta un gran desafío para líderes, analistas y planificadores. Un informe de la Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) mencionó: “Complexity is a core feature of most policy issues today; their components are interrelated in multiple ways. Yet, governments are ill-equipped to deal with complex problems” [La complejidad es una característica cardinal de la mayoría de los asuntos actuales de políticas; sus componentes están interrelacionados en múltiples formas. Sin embargo, los gobiernos están mal equipados para enfrentar problemas complejos.] (OECD, 2017).

Aunque existe unanimidad en su importancia, no hay una definición aceptada de complejidad. Sin embargo, Cilliers (1998), produjo una lista de las principales características de sistemas complejos, que incluyen:

- El número de elementos es enorme y los elementos interactúan dinámicamente.
- Las interacciones son múltiples – cualquier elemento afecta y es afectado por muchos otros.

- Las interacciones no son lineales – pequeños cambios en inputs pueden causar cambios muy importantes en los outputs.
- Cualquier interacción puede retroalimentarse a sí mismo directamente o después de un número de etapas intermedias.
- Tales sistemas pueden ser ‘abiertos’ al ambiente (o contexto) donde existen, y es muy difícil o imposible determinar sus límites (“boundaries”).
- Los sistemas complejos evolucionan y su pasado es corresponsable por su comportamiento actual.

### 3.2. Messes y Problemas Wicked

El “systems thinker” (pensador sistémico) Russell Ackoff describió complejas situaciones problemáticas como “messes”. Dado su importancia para el argumento en este artículo, es apropiado citar sus inteligentes palabras en ese respecto (Ackoff, 1974, p. 21):

**“We have come to realize that no problem ever exists in complete isolation. Every problem interacts with other problems and is therefore part of set of interrelated problems, a *system of problems* . . . English does not contain a suitable word for ‘system of problems’. Therefore, I had to coin one. I chose to call such a system a *mess*. . . The solution to a mess can seldom be obtained by independently solving each of the problems of which it is composed . . . The attempt to deal *holistically* with a [messy problematic situation] is what *planning*, in contrast with problem solving, should be all about”** (cursiva en el texto original).

[Nos hemos dado cuenta de que ningún problema existe en un aislamiento completo. Cada problema interactúa con otros problemas y es por lo tanto parte de un conjunto de problemas interrelacionados, un *sistema de problemas* . . . El idioma inglés no tiene una palabra adecuada para ‘sistemas de problemas’. Por lo tanto, tuve que acuñar una palabra. Elegí el llamar a ese sistema un ‘mess’ (desorden o lío). La solución a un ‘mess’ raramente puede obtenerse resolviendo independientemente cada uno de los problemas que lo componen ... El tratar de enfrentar holísticamente a una [situación problemática ‘messy’] es lo que la planificación tendría que ser, a diferencia de la resolución de problemas.]

En una línea similar de argumentación, los planificadores Rittel y Webber (1981) consideraron que la complejidad crea problemas ‘wicked’ (perversos). Las principales características de estos problemas incluyen las siguientes: (i) todos los problemas wicked son únicos, (ii) no resulta totalmente claro cuando una solución se alcanza, (iii) tienen múltiples causas interdependientes, (iv) existen muchas explicaciones para un problema “wicked”, dependiendo del punto de vista de los observadores.

Innegablemente, el cambio de clima y los eventos climáticos extremos son ‘messes’ y problemas ‘wicked’, y la implementación de acciones apropiadas de mitigación y adaptación ahora determinará las condiciones de la futura existencia de los seres humanos y de los ecosistemas en el planeta Tierra.

La conclusión alcanzada por aquellos que se han enfrentado con ‘messes’ y problemas ‘wicked’ en la práctica es que los enfoques basados solamente en soluciones tecno-económicas no pueden enfrentarlos (y menos resolverlos) en forma satisfactoria. Systems Thinking claramente asiste a analistas, planificadores y ‘decision-makers’ (hacedores de decisiones) a navegar la complejidad y enfrentar ‘messes’ y problemas ‘wicked’ (Jackson, 2020).

### 3.3. Systems Thinking

En las últimas décadas, reconocidos científicos, filósofos e historiadores en ciencia, y practicantes en múltiples disciplinas proporcionaron ímpetus para, y los fundamentos de, un nuevo paradigma de investigación y práctica denominado “Systems Thinking”, que tiene ahora una historia intelectual y práctica bien establecida [En el resto del artículo se emplea el término en inglés sin comillas.]

**Systems Thinking es un conjunto de conocimientos y habilidades holísticas (sistémicas) y analíticas (racionales) que se emplean en la identificación y comprensión de sistemas para vaticinar sus comportamientos en el futuro y diseñar e implementar modificaciones a los mismos (o inventar nuevos sistemas) con la intención de producir efectos deseables.**

“ . . . systems concepts and principles need to be pulled together in a theoretically informed way to provide responses to different levels of complexity. When systems practitioners do this, employing systems ideas coherently to manage complexity and the wicked problems to which it gives rise, they are said to be using a ‘systems methodology’” (Jackson. 2024, p. 39). [. . . los conceptos y principios de sistemas necesitan ser integrados en forma teóricamente informada para dar respuestas a los distintos niveles de complejidad. Cuando los practicantes en sistemas emplean ideas de sistemas en forma coherente para manejar la complejidad y los problemas ‘wicked’ que ella crea, dicen que están usando una metodología de sistemas.]

Avances teóricos y prácticos en Systems Thinking han ocurrido últimamente en relación con *multi-metodología* – combinación de metodologías (posiblemente de distintos paradigmas) y métodos (modelos y técnicas) en una intervención sistémica. Enfoques multi--metodológicos se están transformando en la norma para enfrentar problemas complejos y ‘wicked’, tanto en la práctica como en la investigación, en diversas disciplinas. Esto abre importantes posibilidades para resolver situaciones problemáticas en múltiples campos. Al presente hay disponibles una rica variedad de metodologías y métodos en Systems Thinking, que se pueden emplear en forma flexible respondiendo a las particularidades únicas del contexto, sistema y de la situación problemática en consideración. Las mismas expresan distintos razonamientos en relación con los aspectos más importantes de la complejidad y buscar enfrentarlos en formas diferentes (Sposito Acquistapace, 2025) – ver **Apéndice 2**. Volveremos sobre este tópico en las conclusiones del artículo.

## **4. CAMBIO DEL CLIMA EN URUGUAY**

### **4.1. Proyecciones**

Uruguay es muy vulnerable a los cambios climáticos debido a la influencia del clima en la producción agropecuaria y forestación, fuentes energéticas, sistemas de aguas y en el turismo internacional. La adaptación al clima en el país se centra así en la sostenibilidad de la producción alimenticia, forestación, energía, recursos del agua, y sectores de la salud pública (Ministerio de Ambiente, SNRCC, 2021).

Las **Figuras 4(a) y 4(b)** muestran las proyecciones del clima para Uruguay – temperatura y precipitación – en cuatro escenarios ilustrativos mencionados en la Sección 2.3. Las imágenes fueron producidas por medio del excelente World Bank Climate Change Knowledge Portal - CCKP (World Bank, 2024). El CCKP es el principal HUB (CENTRO DE OPERACIONES) sobre datos del clima global y por países y cuencas, con información y herramientas para apoyar la toma de decisiones en relación con los cambios climáticos. Los datos se presentan en múltiples escalas en contextos históricos, medias climatológicas, anomalías, tendencias, y variabilidad inter-anual e inter- estaciones.

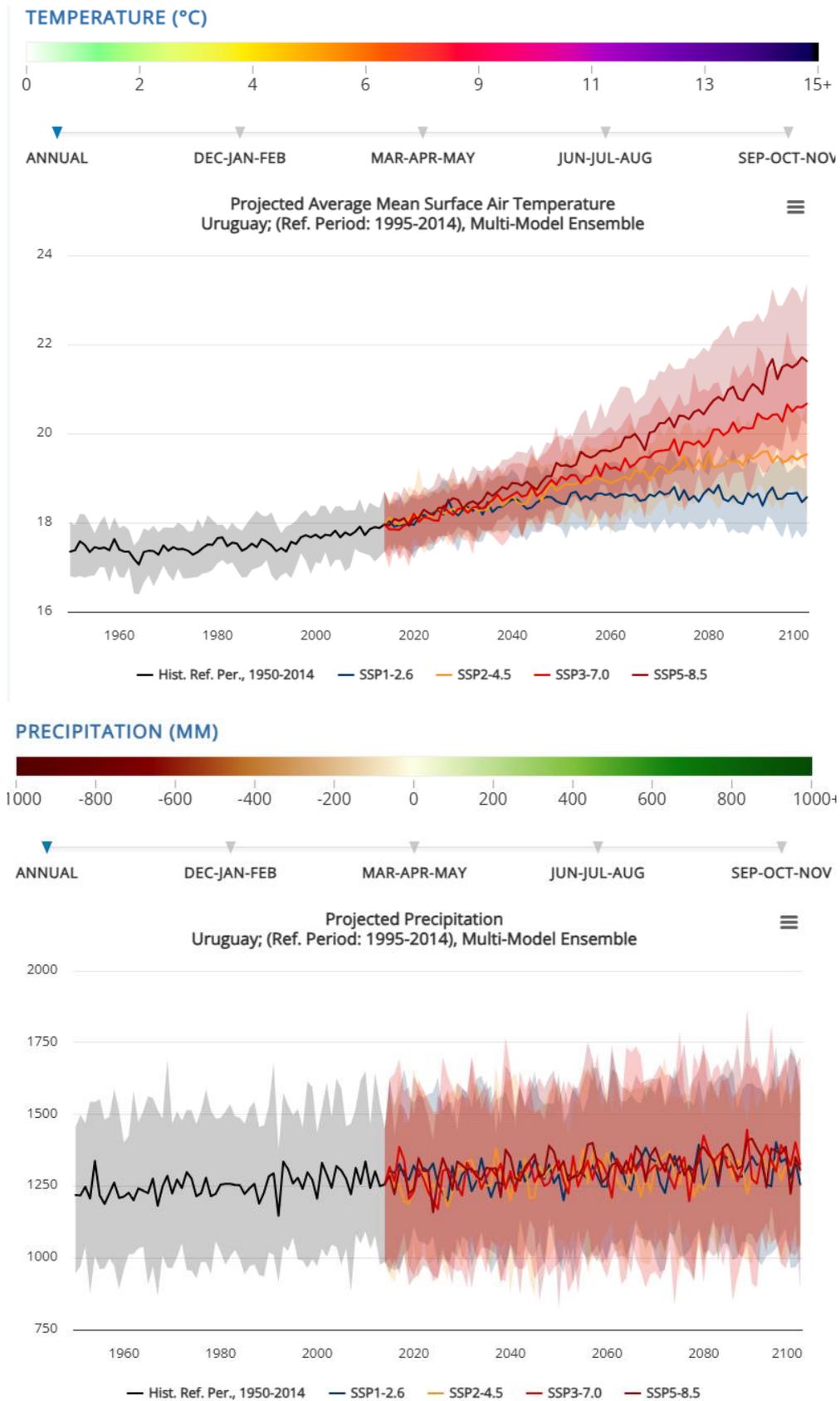


Figura 4(a). Proyecciones de la temperatura media anual promediada en la superficie de la tierra en Uruguay.  
Figura 4(b). Proyecciones de las precipitaciones medias anuales en Uruguay. Fuente: CCKP, 2024.

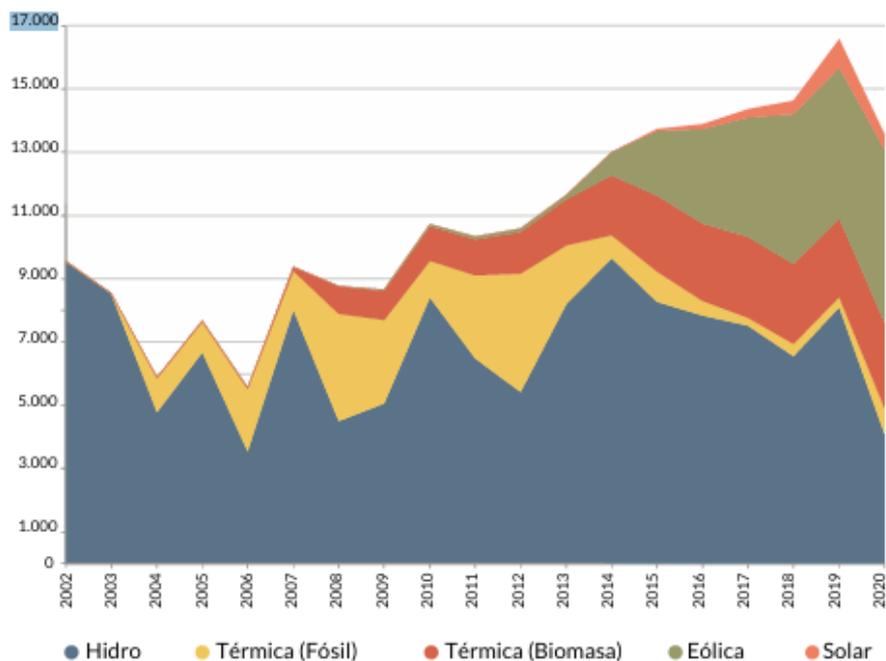
Las proyecciones exhiben un aumento en la temperatura media anual cuasi-lineal en el tiempo y, además, cuanto mayor es el forzante radiativo mayor es el aumento. Sin embargo, en el horizonte cercano las diferencias entre los diferentes forzantes antropogénicos son menores diferenciándose a partir del año 2050. Para el horizonte cercano (2021-2040), los modelos del cambio del clima proyectan para Uruguay el aumento de la *temperatura media anual promediada en la superficie de la Tierra* entre 1.2°C y 1.9°C y no hay diferencias grandes entre los escenarios. Para el horizonte lejano (2081-2100), en el escenario SSP5-85 el aumento de temperatura oscilaría entre 2.6°C y 5.5°C. El aumento en la temperatura estará acompañado por un incremento en el contenido de vapor de agua en la atmósfera, por lo que se intensificarán las tormentas y precipitaciones torrenciales en ausencia de otros cambios (Barreiro *et al.*, 2021; World Bank, 2024).

En cuanto a las proyecciones de las *precipitaciones medias anuales* en todo el país, la acumulación anual de lluvias representaría un cambio entre -5% y 10% para el horizonte cercano y entre -7% y 35% para el horizonte lejano dependiendo del escenario y del modelo. En el otoño se proyecta un aumento en las lluvias cercano al 30%, máximo en el noreste del país. En el verano se proyecta también un incremento en las lluvias con máximos en el norte y litoral del país cercanos a 20%. Debe notarse que la estructura espacial (territorial) de las proyecciones en el futuro tiene similitudes con las tendencias observadas, lo cual sugiere que se continuará en la misma dirección de los cambios ya experimentados. Los modelos climáticos no proyectan una tendencia definida para el invierno, excepto quizás un incremento pequeño en el este del país. Por último, la primavera muestra un patrón con forma de dipolo con incremento en el sur de Brasil y disminución en el suroeste de Uruguay - una estructura diferente a la tendencia observada hasta la fecha. El aumento en el acumulado de clima viene acompañado de un aumento en la frecuencia de ocurrencia de eventos extremos de lluvia y una disminución en el número de días con lluvias tenues a fines del Siglo XXI. Estos cambios son mayores para el escenario de mayor uso de combustible fósiles (Barreiro *et al.*, 2021; World Bank, 2024).

La *Estrategia Climática de Largo Plazo de Uruguay – ECLP* (Ministerio de Ambiente, SNRCC, 2022) es un documento excelente preparado por el Gobierno de Uruguay. Las Secciones 5 y 6 resumen la información incluida en la estrategia y la complementan con otra nueva.

## **5. ADAPTACIONES EN SISTEMAS DE ENERGIA**

Uruguay no tiene reservas de hidrocarburos; es un importador de petróleo que es refinado por ANCAP y tiene un bajo consumo de gas natural que es importado. La generación de electricidad se efectuó históricamente con centrales hidroeléctricas complementadas con centrales termoeléctricas en base a combustibles fósiles líquidos. La hidroelectricidad tiene una alta y creciente vulnerabilidad al cambio y la variabilidad climática. A partir de la Política Energética (2008-2030) se realizó una transformación estructural muy rápida en el país, introduciendo generación eléctrica a partir de biomasa, eólica y solar en alta proporción (76% de la potencia instalada es renovable), en una sinergia entre adaptación y mitigación, como muestra la **Figura 5**.



**Figura 5. Generación de electricidad por fuente acumulada.** Fuente: Ministerio de Ambiente, SNRCC, 2022, p. 39.

Uruguay, en lo que se denomina primera *transición energética*, logró la descarbonización de la generación de energía eléctrica con una participación de renovables en la matriz eléctrica superior al 90%. La *segunda transición energética* incluye la descarbonización del resto del sector energético (transporte e industria), la producción de materias primas verdes para uso industrial, y el desarrollo del hidrógeno verde y sus derivados para exportación y para el mercado local, inicialmente para el transporte de carga y colectivo de pasajeros de larga distancia (Ministerio de Industria, Energía y Minería - MIEM, 2023; Sposito Acquistapace, 2023).

De acuerdo con información del Ministerio de Industria, Energía y Minería (Web) y Mesorio (2023 y comunicación personal), los proyectos de hidrógeno en Uruguay incluyen los siguientes. El proyecto aprobado y en etapa de ejecución es el denominado Khairós que comprende la construcción de una planta de producción de hidrógeno verde ubicada en Fray Bentos en el departamento de Rio Negro. En primera instancia esta planta estará abocada a suministrar combustible limpio a seis camiones pesados Hyundai propiedad de la empresa fabricante de celulosa Montes del Plata. Representa una inversión de US\$ 40 millones con producción de hidrógeno a partir de la electrólisis de agua (electrolizador PEM de 2MW) con la energía generada en un parque fotovoltaico. Otros tres proyectos están en la etapa de estudios de factibilidad - HIF Global, H24U y Tambor-Enertrag (Sposito Acquistapace, 2023).

Un estudio reciente por el Observatorio de Energía y Desarrollo Sustentable de la Universidad Católica de Uruguay (UCU) para la Cámara de la Construcción del Uruguay (Perroni *et al.*, 2024) analizó: (i) la infraestructura que requerirán los proyectos de hidrógeno verde, (ii) los requerimientos y sustentabilidad del uso de los recursos hídricos, y (iii) el desarrollo de un marco regulatorio que permita el desarrollo del sector y sus proyectos. La conclusión del estudio es: “el desarrollo de la industria de hidrógeno verde en Uruguay se encuentra condicionado por el desarrollo de factores exógenos (acceso a financiamiento internacional, regulaciones de terceros países u organismos, contexto geopolítico y pecios internacionales). Sin perjuicio de ello, se debe trabajar en los factores internos habitantes en los tres ejes analizados (infraestructura, recursos hídricos y marco normativo) de forma de lograr ser competitivos, y (b) tener reglas de juego claras” (p. 56).

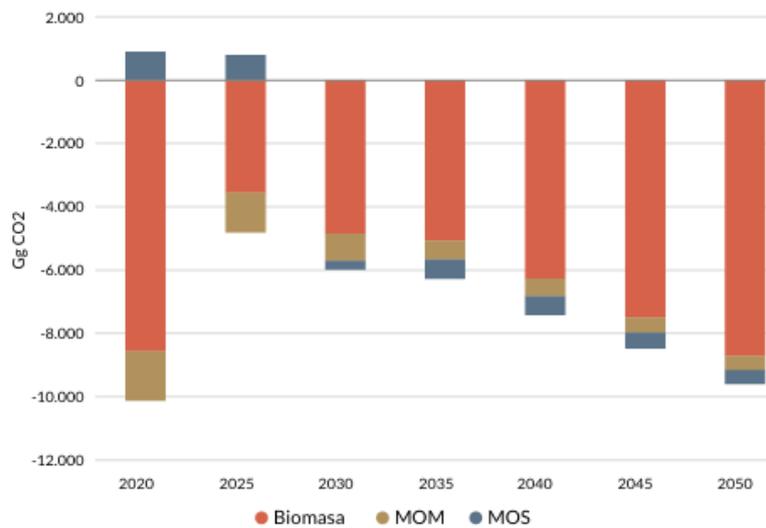
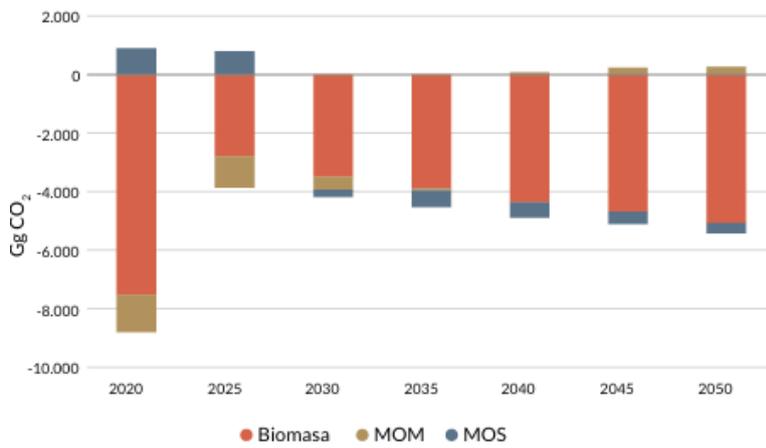
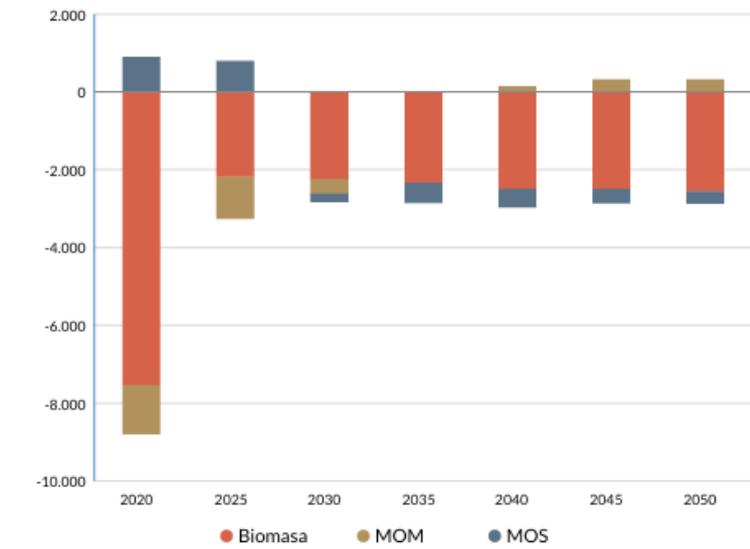
## 6. ADAPTACIONES EN AGRICULTURA, SILVICULTURA Y OTROS USOS DE LA TIERRA

Los usos de la tierra y cambios del uso de la tierra en agricultura, silvicultura y otros usos del suelo (en inglés “AFOLU: agriculture, forestry and other land uses”) tienen gran impacto en la dinámica de emisiones y remociones de los principales reservorios de carbono de Uruguay. Por lo tanto, para proyectar las emisiones a 2050, se realizaron proyecciones de los cambios de los usos del suelo más relevantes para Uruguay a partir del relevamiento nacional de cambios en el uso de la tierra para el período 2000-2017. Ver también Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, 2019.

### 6.2. Emisiones de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)

En el *escenario tendencial* se proyecta una evolución estable de la actividad agropecuaria hasta el año 2050 sin cambios en la orientación presente; es decir, se asume que los cambios de uso de la tierra siguen una trayectoria donde no existen grandes modificaciones en los factores que los determinan. A partir de estos supuestos, se proyectaron las emisiones netas del dióxido de carbono (emisiones menos remociones) en el horizonte temporal hasta 2050. La **Figura 6a** ilustra el efecto del aumento del área de plantaciones forestales con destino comercial y la dinámica de extracción de madera, que a partir del año 2025 tiende a un equilibrio de forma que se estabilizan los flujos y el secuestro de carbono tiende a igualarse con las emisiones.

Se estudiaron también dos *escenarios alternativos*, que recorren trayectorias que maximizan la captura de carbono, acompañando al proceso general de descarbonización de la economía de Uruguay. La biomasa forestal, los suelos forestales y los suelos con cobertura natural de pastizal, son los principales responsables del flujo de remociones de CO<sub>2</sub>. En estos reservorios se proyectaron trayectorias que maximizan las remociones de CO<sub>2</sub> hasta el año 2050. Se identificaron así dos escenarios que conducen al incremento de biomasa viva en tierras forestales: (i) *Fnat* donde aumenta la superficie de bosque nativo (**Figura 6b**) y (ii) *Fmad* donde además hay un aumento de la superficie de plantaciones forestales, impulsado por la industria de madera para construcción (**Figura 6c**). En los dos escenarios se plantea la expansión del área de montes de abrigo y sombra en la superficie ganadera del territorio para una mayor captura de carbono asociada al aumento de la biomasa leñosa.



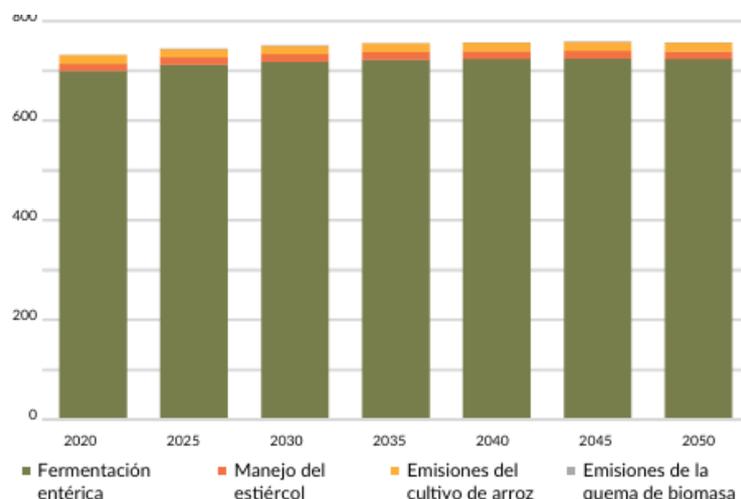
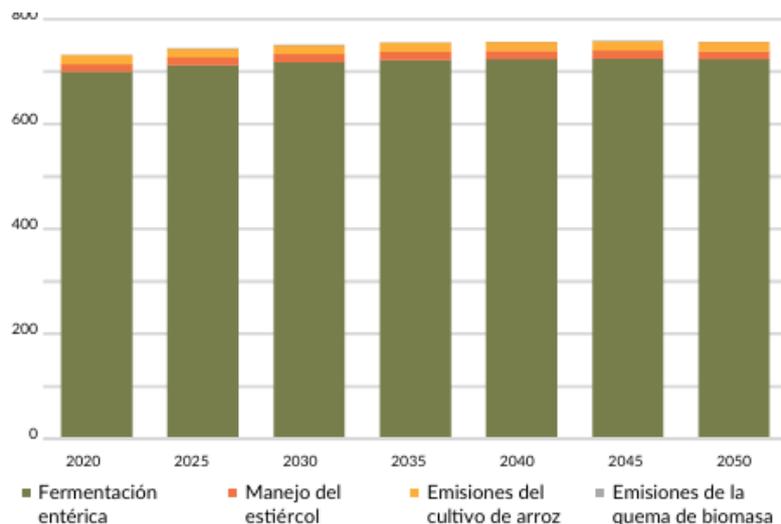
Figuras 6. Emisiones netas de CO<sub>2</sub> por reservorio de carbono (Gg CO<sub>2</sub>); Figura 6a - Escenario tendencial, Figura 6b – Escenario *Fnat*, Figura 6c – Escenario *Fmad*. Fuente: Ministerio de Ambiente, SNRCC, 2022, p. 21., p. 22 y p. 23, respectivamente.

## 6.2. Emisiones de Metano (CH<sub>4</sub>)

El metano (CH<sub>4</sub>) es un GEI de vida corta, cuyo tiempo de permanencia en la atmósfera es entre 10-13 años, a diferencia del CO<sub>2</sub> que permanece en la atmósfera hasta 1000 años. El metano contribuye alrededor del 6% de todas las emisiones de los GEI, la mayoría provenientes de la producción ganadera. Estas, a diferencia de las emisiones de origen fósil, tienen su origen en procesos biológicos naturales como la digestión entérica y son parte del ciclo biológico del carbono. Por lo tanto, la cantidad remanente de CH<sub>4</sub> en la atmósfera, a los 10-13 años de haber sido emitido, es relativamente muy baja. Sin embargo, el potencial del calentamiento global del CH<sub>4</sub> es 28 veces mayor que el potencial del CO<sub>2</sub>. Esto significa que, si se toman acciones para reducir las emisiones del metano ahora, podemos reducir la contribución de la agropecuaria más rápido.

En Uruguay, el 93% de las emisiones del metano provienen del sector agropecuario. Las principales fuentes de emisión de este gas son: la fermentación entérica del ganado vacuno no lechero; la fermentación entérica del ganado lechero, ovino y de otros animales rumiantes y no rumiantes; el manejo del estiércol, el cultivo de arroz y la quema de biomasa.

Para la proyección de emisiones de CH<sub>4</sub>, al igual que para las emisiones de CO<sub>2</sub>, en el *escenario tendencial* se proyecta una evolución estable de la actividad agropecuaria al 2050 sin cambios en la orientación presente (**Figura 7a**). Las emisiones de metano del sector AFOLU en 2050 tendrían un aumento de 22,55 Gg. Este aumento estaría compuesto por un incremento de 2,9% de las emisiones por fermentación entérica del ganado (20,57 Gg), 2,2% de incremento de las emisiones por manejo de estiércol (0,33 Gg) y 10,4% de incremento en las emisiones del cultivo de arroz (1,67 Gg) sobre cada categoría. Como *escenario alternativo* se formuló un escenario ganadero en donde el sector estabiliza sus emisiones de CH<sub>4</sub> y no contribuye con calentamiento adicional (**Figura 7b**). En este escenario se propone un aumento de la productividad con estabilidad de emisiones que resultan en una disminución de la intensidad de emisiones por unidad de producto. Esto se lograría a través de mejoras de la tasa de procreo y tasa de extracción para faena con estabilización del stock total vacuno.



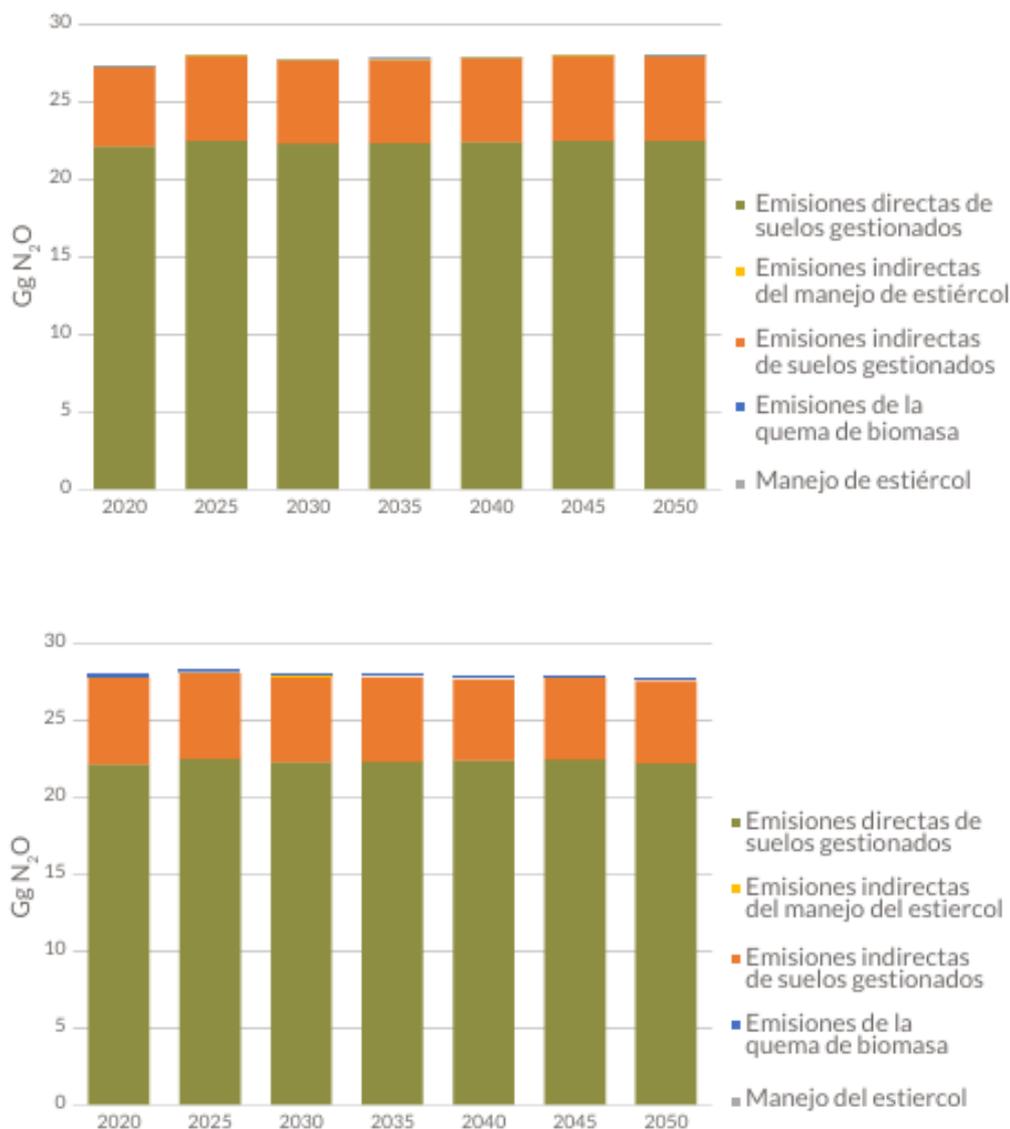
**Figuras 7. Emisiones de CH<sub>4</sub> según fuente de emisión (Gg CH<sub>4</sub>); Figura 7a - Escenario tendencial; Figura 7b – Escenario alternativo.** Fuente: Ministerio de Ambiente, SNRCC, 2022, p. 61 y p. 62, respectivamente.

### 6.3. Emisiones de Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O)

Las emisiones en Uruguay de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), al igual que las emisiones CH<sub>4</sub>, derivan en su gran mayoría del sector agropecuario (96% de las emisiones totales de N<sub>2</sub>O). En este sector las fuentes de emisión del N<sub>2</sub>O son emisiones directas de óxido nitroso por deposición de orina y heces en áreas de pastoreo (80,6%), seguidas por aplicación de fertilizantes (10,6%), descomposición de residuos de cultivos (4,8%) y mineralización del nitrógeno del suelo por cambios en el uso de la tierra (3,6%). Las emisiones indirectas de óxido nitroso, por volatilización y lixiviación, representaron el 19,5% de las emisiones totales de N<sub>2</sub>O de AFOLU.

De acuerdo con las proyecciones al año 2050, en el *escenario tendencial*, las emisiones de N<sub>2</sub>O se incrementarían un 1,6% en el período 2017-2050, aumentando en 0,43 Gg. Las emisiones directas de suelos gestionados asociadas a la ganadería explican el 80% de dicho incremento (**Figura 8a**). En el *escenario alternativo* se propone un aumento de la productividad con estabilidad de emisiones que resultan en una disminución de la intensidad de emisiones por unidad de producto (**Figura 8b**). Esto

se lograría a través de mejoras tecnológicas que se traducirían en aumentos de la tasa de procreo y tasa de extracción para faena con estabilización del stock total vacuno. Las emisiones de N<sub>2</sub>O, en este escenario mostrarían una caída de 0,6% (-0,16 Gg) explicado principalmente por la disminución de las emisiones directas de suelos gestionados (-0,15 Gg), asociadas a una menor pérdida de materia orgánica y menor uso de fertilizantes nitrogenados por cambio en el uso del suelo.



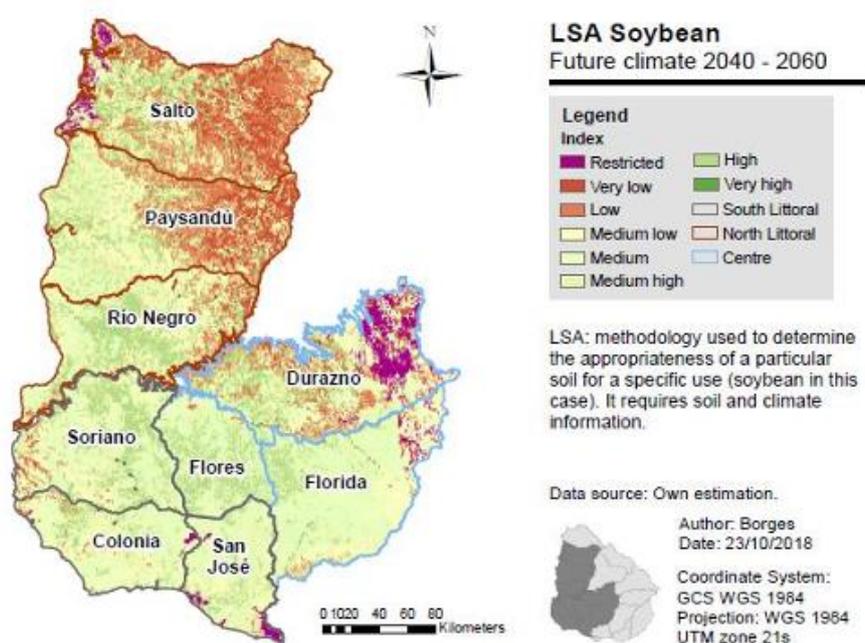
**Figuras 8. Emisiones de óxido nitroso según fuente de emisión (Gg N<sub>2</sub>O): Figura 8a - Escenario tendencial, Figura 8b – Escenario Alternativo.** Fuente: Ministerio de Ambiente, SNRCC, 2022, p. 69.

En las conclusiones del análisis del óxido nitroso se indica “ Como fuera mencionado para el caso del CH<sub>4</sub>, aún no existen tecnologías consolidadas que permitan reducir las emisiones de estos gases en las actividades productivas, sin que ello comprometa la producción de alimentos, por lo que se plantea para un escenario alternativo que conduce a la estabilidad de emisiones de N<sub>2</sub>O y que no contribuye con calentamiento adicional” (Ministerio de Ambiente, SNRCCC, p. 70).

En relación con estas conclusiones, las subsecciones siguientes introducen nuevas investigaciones y productos que ofrecen oportunidades para la adaptación en el sector AFOLU.

#### 6.4. Otros Tipos de Adaptaciones en AFOLU

**Aptitud de la Tierra** - La metodología de la *Aptitud de la Tierra* ("Land Suitability Analysis" - LSA), formulada por Sposito y sus colegas en la Universidad Deakin, permite determinar las mejores áreas para cultivos en un territorio de acuerdo con cambios climáticos. La metodología LSA requiere generar un árbol de toma de decisiones ("decisión tree") que, en su parte superior, incluye tres ramas: clima (histórico y proyecciones), suelo y topografía. La **Figura 9** muestra los resultados de la aplicación de la metodología LSA para la producción de soja como cultivo de verano en Uruguay, realizada por Magdalena Borges en su tesis de Master of Science (Research) en Desarrollo Sostenible Regional. Las áreas indicadas en color verde fuerte son las más resilientes a los proyectados cambios climáticos y que además requieren menos suministros (como, por ejemplo, fertilizantes y riego). La tesis de Borges incluye también explicaciones sobre la metodología LSA y un análisis económico completo en relación con la producción de la soja en el país.



**Figura 9. Aptitud de la tierra para el cultivo de la soja en Uruguay – futuro escenario del clima 2040-2060.**

Fuente: Borges, 2019, p. 80.

En consecuencia, la aplicación de la metodología LSA, utilizando proyecciones del cambio del clima para múltiples cultivos (actuales y potenciales) y forestación, permitiría determinar las mejores áreas en el territorio uruguayo para cada uno de los plantíos considerados y lograr así una efectiva adaptación al cambio del clima en el sector AFOLU. Sposito y sus colegas en Deakin formularon más de 50 modelos de cultivos y forestación para Australia que pueden fácilmente ajustarse a los factores/valores existentes en Uruguay. Ver también Sposito Acquistapace, 2024b.

**Pasturas** – Muchas especies de pasturas han sido identificadas con propiedades anti-metanogénicas, pero no todas producen reducciones del metano en la ganadería. Compuestos secundarios, o metabolitos, de las pasturas como los taninos y las saponinas tienen la posibilidad de reducir el CH<sub>4</sub> en rumiantes. Un artículo de Badgery *et al.* (2023) cubre en forma extensa las distintas posibilidades de especies de pasturas en la reducción del metano (aunque con referencia a Australia). Se concluye en

el artículo que la biserrula (*Biserrula pelenicus*) tiene un gran potencial para reducir las emisiones entéricas de metano, seguida de Chicory (*Cichorium intybus*). Biserrula es una leguminosa anual, que contiene fenólicos y saponinas, que se adapta muy bien en suelos con fertilidad baja, suelos ácidos y con una gran variedad de condiciones pluviales (325- 700 mm/año). Chicory es un pasto perenne con raíces profundas que también se adapta a una gran variedad de las condiciones del clima y de los suelos y que ha demostrado buen potencial para reducir las emisiones entéricas de metano ya que contiene taninos, saponinas y otros componentes fenólicos.

En sus conclusiones, el artículo menciona que hay gran potencial para reducir el metano por medio de pasturas, pero también una gran oportunidad para desarrollar programas de investigación enfocados en la creación de nuevos cultivos/especies de pasturas con valores altos de actividad anti-metanogénica.

**Aditivos a la alimentación ganadera** – Existe también la posibilidad de reducir el metano entérico por medio del uso de varios aditivos a la alimentación ganadera, incluyendo aceites, nitratos, e inhibidoras del metano. Se considera que los aditivos que tienen el mayor potencial son los basados en algas marinas rojas (“red seaweed”) (Black *et al.*, 2021). Científicos de CSIRO (Commonwealth Scientific, Industry and Reserch Organization) de Australia han desarrollado un ingrediente costo-efectivo que se agrega a la alimentación del ganado. Este aditivo usa un tipo de alga roja, nativa a Australia, que reduce las emisiones de metano y tiene además el potencial de aumentar la productividad ganadera. La especie *Asparagopsis* de algas produce un componente bioactivo, llamado, *bioform* que evita la formación de metano al inhibir una enzima específica en los intestinos de los animales durante la digestión de la comida – **Figura 10.**



**Figura 10.** *Asparagopsis* – alga roja que se usa como aditivo en la alimentación ganadera. Fuente: CSIRO Web.

Estas tecnologías pueden implementarse en sistemas intensivos de alimentación, pero hay barreras que deben ser eliminadas para su uso en sistemas extensivos de pasturas a efecto de obtener un impacto en toda la producción ganadera.

## 7. ADAPTACIONES EN SISTEMAS DE AGUAS

De acuerdo con los análisis de estado del clima y los escenarios de los futuros cambios climáticos, presentados en Sección 2 y Subsección 4.1, se puede indicar con un alto grado de confianza que el clima está, y va a estar, pautado por el aumento de la frecuencia de los eventos climáticos extremos asociados, en particular, con intensas precipitaciones ocurriendo en pocas horas, o pocos días, provocando inundaciones con daños a humanos y ecosistemas. Las inundaciones estarán usualmente seguidas por extensos períodos de sequías (definidos como eventos o episodios climático extremos – ver *Apéndice 1*).

**7.1. Pertinentes Iniciativas en Uruguay con relación con los recursos hidrológicos** - El *Plan Nacional de Aguas Pluviales Urbanas para Uruguay* (Ministerio de Ambiente *et al.*, 2023) se enfoca en la adopción de soluciones basadas en la naturaleza (SBN) dentro del concepto de una implementación híbrida con infraestructuras tradicionales denominadas ‘grises’. SBN es un término genérico referente a “acciones que protegen, conservan, gestionan (manejan) en forma sostenible y restauran ecosistemas naturales o modificados, respondiendo a desafíos de la sociedad en forma efectiva y adaptable y que, al mismo tiempo, proveen beneficios para los seres humanos y la biodiversidad” (Cohen-Shacham *et al.*, 2016).

En Mayo del 2024 se firmó un acuerdo entre el Gobierno Uruguayo, a través del Ministerio de Ambiente, y el Gobierno de España para conjuntamente desarrollar el proyecto “*Soluciones basadas en la naturaleza para el manejo sostenible y amortiguar los efectos de la sequía en la cuenca del río Santa Lucía*”. Este proyecto tiene tres objetivos: (i) diseñar, instalar y realizar un seguimiento de zonas de amortiguación con enfoque agroecológico a escala de predio y contribuir al manejo sostenible de áreas riparias (que involucra bosques nativos y humedales); (ii) profundizar en el conocimiento hidrológico a escala de subcuencas para mejorar la gestión sustentable del agua con enfoque de déficit hídrico; (iii) desarrollar acciones de capacitación, difusión y concientización que promuevan la transición hacia sistemas agroecológicos, el uso sostenible del agua y el manejo sostenible de áreas riparias y para amortiguar los efectos de eventos extremos del tiempo (Ministerio de Ambiente, 2024).

### 7.2. Infraestructura Azul-Verde

Definimos (Sposito *et al.*, 2014; Ghofrani *et al.*, 2017) *Infraestructura Azul-Verde* – IAV / azul = agua, verde = vegetación (“Blue-Green Infrastructure” – BGI) como una red interconectada de componentes naturales y diseñados (seminaturales) del paisaje, incluyendo ríos y arroyos, cuerpos de aguas y espacios abiertos verdes, que proveen funciones múltiples como: (a) control de las inundaciones, (b) reservorios de aguas para el consumo humano, irrigación e industrias, (c) humedales (“wetlands”) para la purificación de aguas o conservación de la flora y fauna, (d) producción de bio-combustibles basados en vegetación de humedales y (e) áreas para actividades recreacionales. Ver también Sposito Acquistapace, 2024a.

Un antecedente importante de la IAV es la extensa *Planificación Espacial Estratégica* realizada durante décadas en los Países Bajos con la intención, en particular, de *dar al río un camino* (“Room for the River Programme”). Este programa se enfocó en importantes intervenciones en el paisaje como la construcción de humedales, células (áreas) de bio-retención, zanjas o bajíos vegetativos (“vegetative swales”) y mejoras en ríos y canales. Las intervenciones fueron complementadas por otras iniciativas como la compra de tierras (por ejemplo, en zonas inundables) y subsidios a los habitantes afectados para que implementaran varios esquemas sostenibles disponibles dentro del programa (Koomen *et al.*, 2012).

SBN e IAV pueden planificarse y construirse en diferentes escalas espaciales (territoriales). La **Figura 11** muestra tres escalas espaciales: – a *nivel regional*, la escala de cuenca fluvial, a *nivel urbano*, la escala de ciudad, y a *nivel local*, la escala barrial. Por ejemplo, la recuperación de bosques y la

restauración de planicies de inundación pueden ayudar a manejar los riesgos de inundación en la escala de cuenca fluvial, mientras que las áreas de bio-retención y los volúmenes de detención se pueden planificar a nivel de barrio. En la escala de ciudad, la renaturalización de los arroyos y líneas de drenaje existentes ralentiza los flujos de agua, mientras que el aumento de los espacios verdes abiertos en toda la ciudad puede mejorar la infiltración (Ministerio de Ambiente *et al.*, 2023).



**Figura 11. Tipos de SBN a nivel de cuenca, ciudad y barrio.** Fuente: Ministerio de Ambiente *et al.* (2023), Figura 3-3; adaptado de la publicación del World Bank (2021), Figuras 2-4, 2-5 y 2-6, pp.23-25.

## 8. ADAPTACIONES EN SISTEMAS URBANOS

Las áreas urbanas ocupan alrededor del 4% de las superficies terrestres, pero consumen más del 70% de la energía global y contribuyen más del 70% de los GEI, particularmente dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) debido principalmente al transporte y al uso de equipos industriales y domésticos que emplean combustibles fósiles. Además, las ciudades son generadoras de lo que se denomina el efecto de "urban heat islands" – (UHIs) (islas urbanas de calor) que ocurren cuando las áreas naturales son remplazadas por infraestructura urbana como calles (especialmente de asfalto), edificios (especialmente de concreto) y otras superficies impermeables. Estas absorben y retienen calor, conduciendo a elevadas temperaturas en áreas urbanas comparadas con áreas rurales, y además generan otros efectos climáticos (IPCC, 2022). En relación con Uruguay ver: Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, 2019.

Hay varias metodologías y modelos utilizados en la planificación del desarrollo sostenible urbano-regional que tienen también efectos positivos en la mitigación y adaptación del cambio de clima. En esta sección se explican brevemente dos de ellos ya que el autor del artículo fue participante en la formulación y aplicación en la práctica.

### 8.1. Urban Buildability Model

El propósito del “*Urban Buildability Model*” - UBD (Modelo de la Aptitud Constructiva) es la identificación de las áreas más adecuadas para el desarrollo urbano-regional teniendo en cuenta múltiples aspectos (factores) relacionados con el medio ambiente, condiciones físicas y características socio-económicas del lugar estudiado. Está basado en la metodología de planificación ecológica formulada por Ian McHarg, presentada en su libro seminal *Design with Nature* (1992). UBD puede ser implementado a nivel de ciudad y de región. Fue inicialmente formulado por Hossain (Hossain *et al.*, 2003; Hossain, 2005) y aplicado en varias regiones en el Estado de Victoria (Sposito, 2021b).

La metodología combina dos métodos de evaluación Multi-Criterio (MCE) – “Analytic Hierarchy Process” – AHP (Saaty, 1977; Saaty and Vargas, 1991 ) y “Weighted Linear Combination” - WLC (Carver, 1991) en un ambiente (plataforma) de Sistemas Geográficos de Información (GIS)<sup>3</sup>. El AHP se emplea para determinar el peso (la contribución) de los varios factores considerados y el WLC se usa para permitir el intercambio (“trade-off”) entre los factores de acuerdo con los pesos determinados por AHP. Este procedimiento produce una matriz de la aptitud para el desarrollo de la región considerada por medio de un “Suitability Index” (Index de Aptitud) continuo, con un rango desde muy bajo a muy alto.

El análisis incluye la consideración de las siguientes categorías:

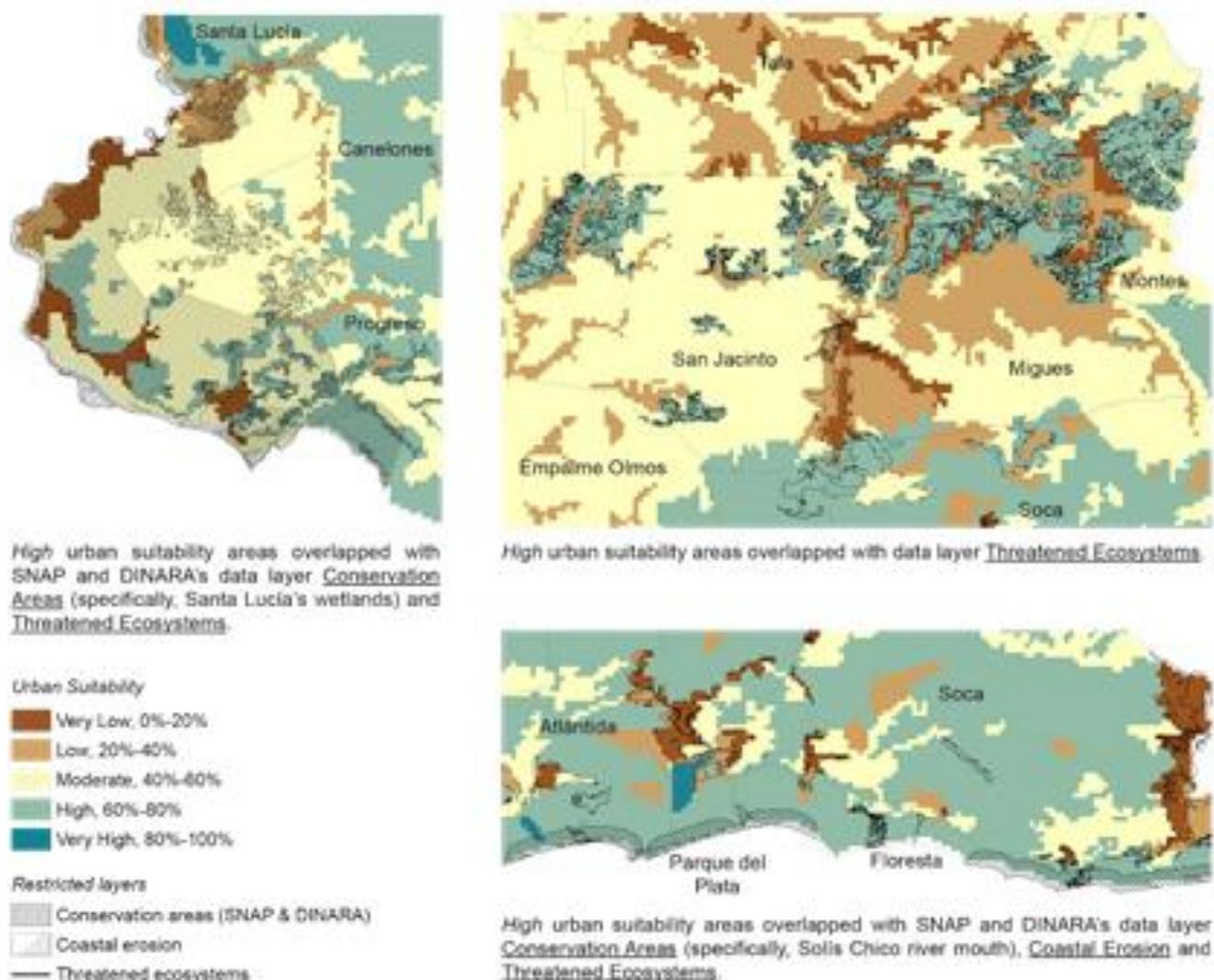
- Aptitud física (“Physical suitability”) – evalúa las características físicas de la región en cuanto facilitan (o restringen o impiden) la construcción por medio del estudio de factores como la aptitud de la tierra para construir fundaciones y edificios; por ejemplo, tipos de suelos - drenaje, salinidad, susceptibilidad a erosión, topografía - pendiente y elevación, vientos y otras condiciones climáticas extremas.
- Aptitud socio-económica (“Socio-economic Suitability”) - evalúa la región en términos de sus características sociales y económicas que facilitan (o limitan) la planificación y la gestión urbana incluyendo la eficiencia de la infraestructura (por ejemplo, red de calles y rutas, suministro de agua potable y energía, drenajes) calidad de los servicios comunitarios (por ejemplo, centros de educación, clínicas, amenidades, bibliotecas) y usos del suelo (residencial, Industrial, comercial, conservación, recreación) permitidos (o restringidos) en forma estatutaria.
- Aptitud ambiental (“Environmental Suitability”) – evalúa la región en términos de sus condiciones ambientales de forma tal que el desarrollo urbano no afecte la calidad del ambiente y los

---

<sup>3</sup> *Multi-Criteria Evaluation* (MCE) is a decision support tool for dealing with complex decisions where technological, economical, ecological, and social aspects must be analysed. MCE methods include *Analytic Hierarchy Process* (AHP), *Weighted Linear Combination* (WLC), Utility Function, Ideal Point Method and Outranking Method. The AHP is a multi-criterion, mathematically based method that combines qualitative and quantitative factors for ranking and evaluating alternatives (scenarios) among which the best solution is ultimately chosen (Saaty, 1977). The AHP is executed via the formulation of a hierarchical representation of a decision-making problem and the analysis of feasible options (alternatives) to resolve it by way of pair-wise comparisons. The AHP can be implemented in a GIS environment to support the assessment and selection of suitable areas for urban development (Bathrellos *et al.*, 2011). The WLC is a method of aggregation which introduces a soft, or “fuzzy”, concept of suitability in standardizing criteria. Instead of the hard Boolean decision of assigning absolute suitability or unsuitability to a location for a given factor, it is scaled to a particular common range where suitable and unsuitable areas are continuous measures. This maintains the variability of criteria and allows factors to trade-off with each other according to the weights derived through AHP (Hossain, 2005).

ecosistemas. Incluye la consideración de factores como vegetación, vida animal salvaje, paisaje, valor histórico, y recursos de aguas.

Lucia Bianchi en su Master of Science (Research) en Desarrollo Sostenible Regional (2019), en la Universidad Deakin y Universidad ORT Uruguay, aplicó el UBD en el estudio del desarrollo del sistema urbano en el Departamento de Canelones. La **Figura 12** muestra algunos resultados del modelaje.



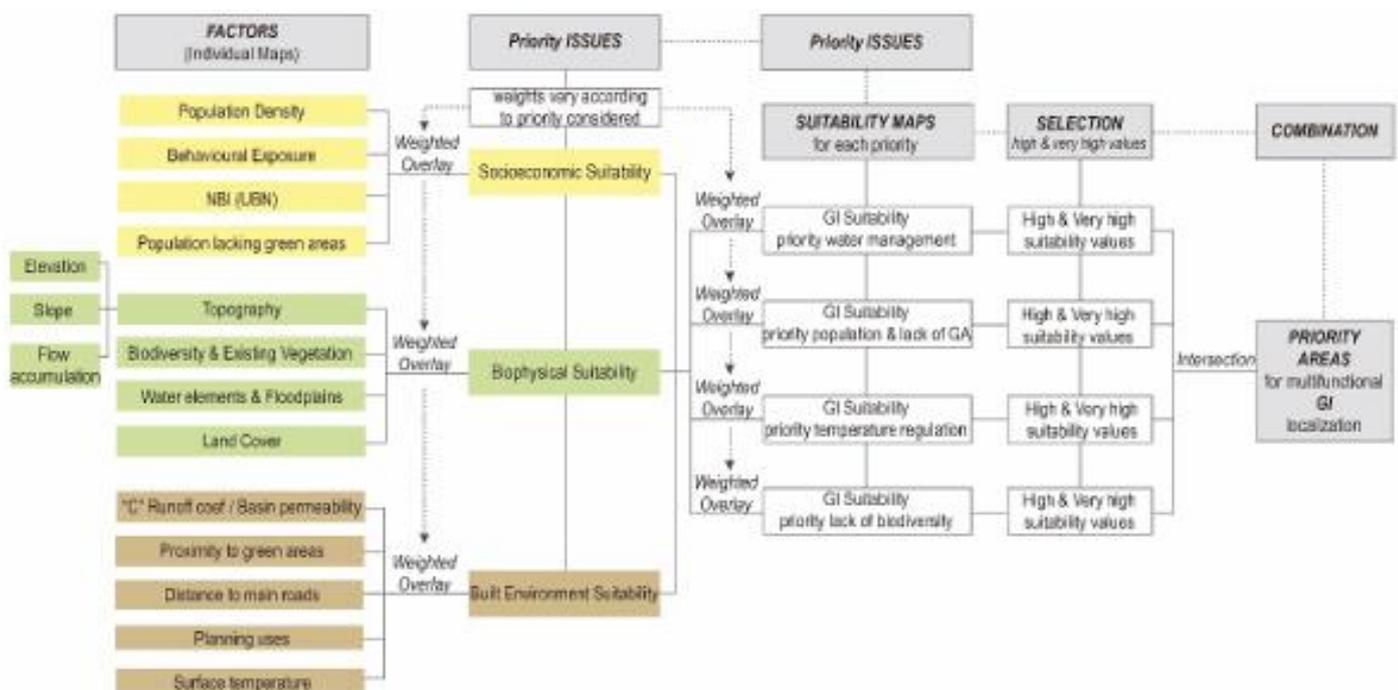
**Figura 12. Aplicación del “Urban Buildability Model” en el Departamento de Canelones, Uruguay.** Fuente: Bianchi, 2019, p. 63.

## 8.2. Infraestructura Urbana Verde (“Urban Green Infrastructure”)

La *Infraestructura Urbana Verde* es a una red (sistema) de espacios verdes (naturales y seminaturales) en áreas urbanas diseñadas y manejadas con el propósito de suministrar múltiples servicios de los ecosistemas y otros beneficios a varias escalas espaciales. Por su enfoque integrado, multifuncional, IUV puede emplearse en enfrentar una variedad de desafíos urbanos, incluyendo la conservación de la biodiversidad, adaptación al cambio del clima, apoyo a una economía sostenible (verde) y mejorar

la cohesión social (Hansen *et al.*, 2018). Los beneficios del IUV dependen de la ubicación, proximidad a la población y sus características.

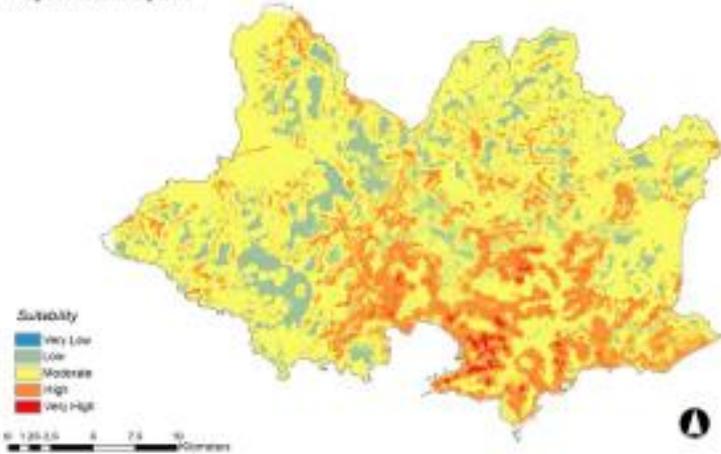
Agustina Apud, en su Master of Science (Research) en Desarrollo Sostenible Regional (2020), en la Universidad Deakin y Universidad ORT Uruguay, investigó la implementación de IUV en el Departamento de Montevideo – ver también Apud *et al.*, 2020. La metodología formulada por Apud, que denominó “Green Infraestructure Suitability Model” (GISM), emplea también el “Analytic Hierachy Process” en un ambiente/plataforma de Sistemas Geográficos de Información (GIS). Los criterios y los pesos determinados en el AHP, para cada uno de los aspectos prioritarios, relacionados con la aptitud socio-económica, biofísica y entorno construido, se muestran en la **Figura 13**. El modelaje produce un mapa para cada uno de los aspectos prioritarios.



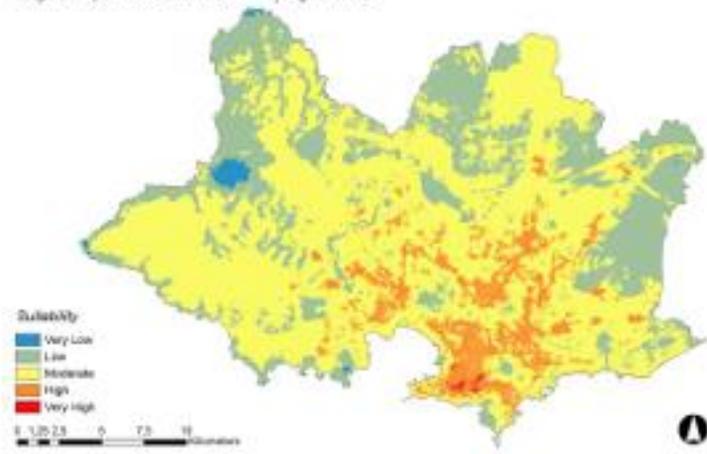
**Figura 13. Estructura del “Green Infraestructure Suitability Model” (GISM).** Fuente: Apud, 2020, p. 77.

La **Figura 12** muestra los resultados de la aplicación del GISM identificando las áreas en Montevideo donde la construcción de Infraestructura Verde produciría los mayores beneficios respondiendo a cada uno de los aspectos prioritarios seleccionados. Las áreas en color azul son la de menor valor mientras que las áreas en rojo son las de mayor valor.

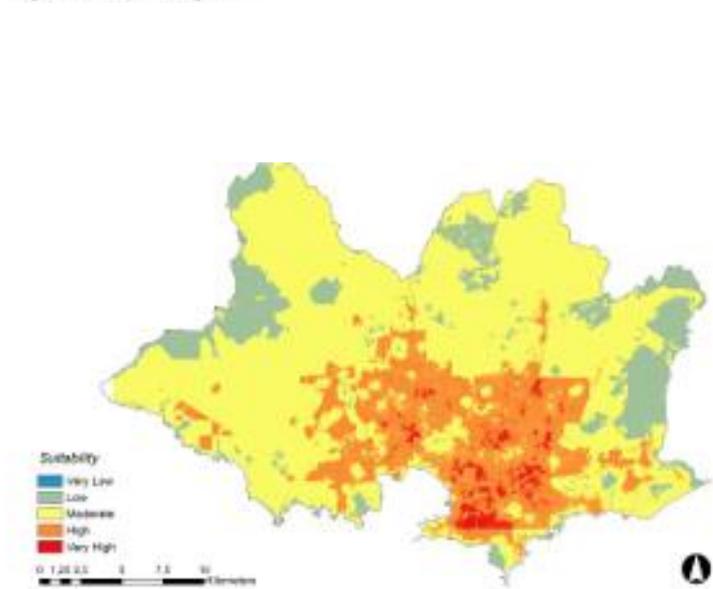
Green Infrastructure Suitability  
Weight on Water management



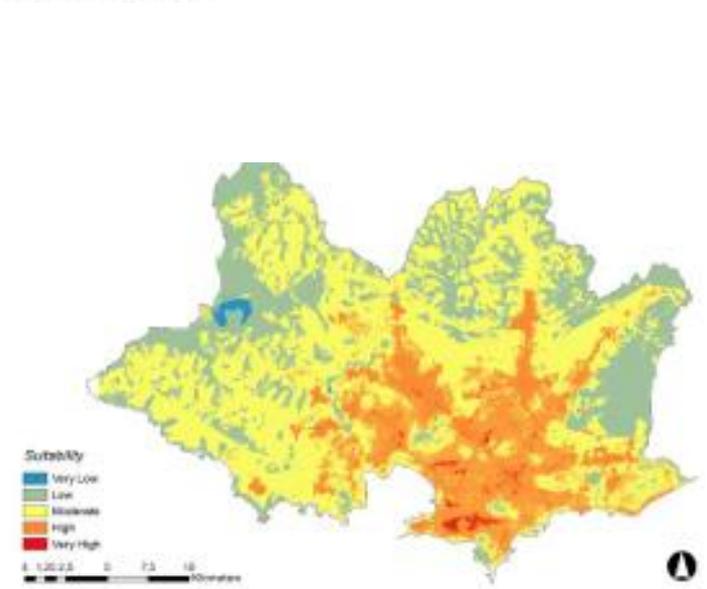
Green Infrastructure Suitability  
Weight on Population inclusion and Proximity to green areas



Green Infrastructure Suitability  
Weight on Local temperature regulation



Green Infrastructure Suitability  
Weight on Biodiversity increase



**Figura 14. Mapas de aptitud para Infraestructura Verde de acuerdo con prioridades – manejo de aguas, inclusión de la población y proximidad a áreas verdes, regulación de la temperatura, aumento de la biodiversidad. Fuente, Apud, 2020, p.90.**

El análisis de los resultados de la aplicación del GIS y la superposición de los mapas de aptitud permite finalmente producir opciones para la ubicación de la Infraestructura Verde. Notar que los mapas son a nivel estratégico; las áreas identificadas en ellos deben ser investigadas al nivel local.

## 9. CONCLUSIÓN – ENFRENTANDO EL DESAFÍO DEL CAMBIO DE CLIMA

El desafío presentado por el cambio de clima es muy complejo (“messy” y “wicked”), fundamental a la humanidad toda y afecta a esta generación y las futuras. Es una cuestión de conjetura (“foresight”) porque requiere ver hacia un incierto futuro para determinar que políticas y acciones deben formularse e implementarse ahora. Está relacionado con el manejo del riesgo, porque no podemos predecir el futuro sino simplemente explorar las posibilidades e indicar probabilidades, que están condicionadas por el comportamiento humano y los medios de implementación de hoy. Es también una cuestión de confianza – confianza en la ciencia, confianza en que la ingenuidad y adaptabilidad humana pueda enfrentar el desafío, y confianza en que las personas actúen de acuerdo con la información científica y no con espurios comentarios.

En este contexto, el artículo presenta un resumen de la situación actual en relación con el estado del tiempo y los cambios climáticos, así como posibles escenarios formulados por la IPCC desde beneficiosos hasta catastróficos. Describe también varias soluciones consideradas y/o implementadas.

Sin embargo, como se explicó en la Sección 3, las ‘soluciones’ basadas únicamente en enfoques técnico-económicos no son suficientes. Estos enfoques deben ser complementados con innovadoras perspectivas, metodologías y métodos formulados dentro del nuevo paradigma de “Systems Thinking” (Pensamiento Sistémico). Con ese propósito, formulamos una metodología que permite determinar en cada situación problemática el mejor enfoque utilizando una combinación de metodologías y métodos de varios paradigmas (ver Sposito Acquistapace, 2025). La metodología incluye cuatro etapas iterativas: (i) Explorar la situación problemática – establecer los límites (“boundaries”) de la intervención sistémica, (ii) Formular una estrategia para la intervención – seleccionar metodología(s) y método(s), (iii) Intervenir en forma flexible – implementar / iterar, (4) Evaluar el progreso de la intervención – acordar los próximos pasos. Al presente hay disponibles una rica variedad de metodologías y métodos en Systems Thinking que se pueden emplear en forma flexible respondiendo a las particularidades únicas del contexto, sistema y de la situación problemática en consideración. Las mismas expresan distintos razonamientos en relación con los aspectos más importantes de complejidad y buscar enfrentarlos en modos diferentes – ver *Apéndice 2*.

Es apropiado entonces concluir este artículo con las sabias palabras de David Attenborough en *A Life on Our Planet* (2020, pp. 220-221; cursivas en el texto original):

***“Homo sapiens, the wise human being, must now learn from its mistakes and live up to its name. We who are alive today have the formidable tasks of making sure that our species does so. . . we have an ability perhaps unique among the living creatures on the planet – to imagine a future and working towards achieving it . . . All we require is the will. . . Our future on the planet, the only place as far as we know where life of any kind exist, is at stake.”***

## APÉNDICE 1

### GLOSARIO DE LOS PRINCIPALES TÉRMINOS Y CONCEPTOS USADOS EN EL ARTÍCULO BASADOS EN LAS DEFINICIONES DE LA IPCC (Annex VII – Glossary, IPCV AR6 WGI)

**Adaptación** – En *sistemas humanos*, adaptación es el proceso de ajuste a los efectos reales o esperados de un cambio climático, para moderar daños o explotar oportunidades. En *sistemas naturales*, adaptación es el proceso de ajuste a un clima presente y sus efectos. La intervención humana por medio de acciones y medidas puede facilitar la adaptación en ambos sistemas. Existen diferentes tipos de adaptación; por ejemplo: anticipatoria y reactiva, privada y pública, y autónoma y planificada. Son ejemplos de adaptación la construcción de diques fluviales o costeros, la sustitución de plantas sensibles al impacto térmico por otras más resistentes.

**Clima** - El clima se suele definir en sentido restringido como el estado promedio del tiempo y, más rigurosamente, como una descripción estadística del tiempo atmosférico en términos de los valores medios y de la variabilidad de las magnitudes correspondientes durante períodos que pueden abarcar desde meses hasta millares o millones de años. El período de promedio habitual es de 30 años, según la definición de la Organización Meteorológica Mundial. Las magnitudes son casi siempre variables de superficie (por ejemplo, temperatura, precipitación o viento). En un sentido más amplio, el clima es el estado del sistema climático en términos tanto clásicos como estadísticos.

**Cambio climático, o cambio del clima** - Cambio del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones de su valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales, a forzamientos externos o a cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso de la tierra. Notar que la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC) de las Naciones Unidas (“UN Framework Convention on Climate Change” - UNFCCC), en su Artículo 1, define el cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. La CMCC diferencia así entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática atribuible a causas naturales.

Para tener en cuenta la variación natural al determinar el calentamiento global provocado por actividades humanas, el IPCC AR6 (Sexto Informe de Evaluación del IPCC Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio de Clima, 2023) evaluó el aumento de la temperatura durante un período histórico de 20 años. Además, estableció como punto de referencia para las evaluaciones de los impactos y riesgos de los cambios climáticos el aumento de la temperatura global promedio en 1.5°C por encima de los valores preindustriales.

**Concentración de dióxido de carbono-equivalente (CO<sub>2</sub> eqv)** - Concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que produciría el mismo forzamiento radiativo que una mezcla de dióxido de carbono y otros componentes del forzamiento. Esos valores pueden tener en cuenta únicamente los gases de efecto invernadero (GEI), o una combinación de gases de GEI y aerosoles. La concentración de dióxido de carbono-equivalente es una métrica para comparar el forzamiento radiativo de una mezcla de diferentes GEI en un momento dado, pero no implica una equivalencia en las respuestas correspondientes en términos de cambio climático ni en el futuro forzamiento. En general no existe conexión alguna entre las emisiones de dióxido de carbono-equivalente y las concentraciones de dióxido de carbono-equivalente resultantes.

**Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)** -- Gas que existe espontáneamente y también como subproducto del quemado de combustibles fósiles procedentes de depósitos de carbono de origen fósil, como el

petróleo, el gas o el carbón, del quemado de biomasa, o de los cambios de uso de la tierra, y otros procesos industriales. Es el gas invernadero antropógeno que más afecta al equilibrio radiativo de la Tierra. Es también el gas de referencia para la medición de otros GEI y, por consiguiente, su potencial de calentamiento mundial es igual a 1.

**Extremo climático (estado/evento/episodio del tiempo extremo, o evento climático extremo)** - Ocurrencia de un valor de estado del tiempo, o de una variable del clima, por encima (o por debajo) de un valor umbral cerca del extremo alto (o bajo) de un rango de los valores observados de la variable en cuestión. Por definición, las características de un *estado del tiempo extremo* pueden variar en función del lugar en sentido absoluto. Un fenómeno extremo, por sí solo, no puede ser atribuido simplemente a un cambio climático antropógeno, ya que hay siempre una probabilidad de que haya ocurrido de manera natural. Cuando una situación de actividad atmosférica extrema persiste durante algún tiempo (por ejemplo, durante una estación), puede clasificarse como *evento/episodio climático extremo*, especialmente si arroja un promedio o un total que es en sí mismo un valor extremo (por ejemplo, sequías o lluvias intensas a lo largo de una estación). Por simplicidad, tanto los extremos del tiempo como los climáticos, se refieren como *extremos climáticos*.

**Efecto invernadero** - Los GEI absorben eficazmente la radiación infrarroja emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera debido a esos mismos gases, y por las nubes. La radiación atmosférica es emitida en todas direcciones, en particular hacia la superficie de la Tierra. Por ello, los GEI retienen calor en el sistema superficie-troposfera. Este fenómeno se denomina *efecto invernadero*. La radiación infrarroja térmica de la troposfera está fuertemente acoplada a la temperatura existente a la altitud en que se emite. En la troposfera, la temperatura suele disminuir con la altura. De hecho, la radiación infrarroja emitida hacia el espacio proviene de una altitud cuya temperatura promedio es de  $-19^{\circ}\text{C}$ , en equilibrio con la radiación solar entrante neta, mientras que la superficie de la Tierra se mantiene a una temperatura mucho más alta, de  $+14^{\circ}\text{C}$  en promedio. Una mayor concentración de GEI da lugar a una mayor opacidad infrarroja de la atmósfera y, por consiguiente, a una radiación efectiva hacia el espacio desde una altitud mayor y a una temperatura menor. Ello origina un forzamiento radiativo que intensifica el efecto invernadero, produciendo así el denominado *efecto invernadero intensificado*.

**Gas de efecto invernadero (GEI), gas invernadero (GI)** - Componente gaseoso de la atmósfera, natural o antropógeno, que absorbe y emite radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja térmica emitida por la superficie de la Tierra, por la atmósfera y por las nubes. Esta propiedad ocasiona el efecto invernadero. El vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ) y el ozono ( $\text{O}_3$ ) son los gases invernadero primarios de la atmósfera terrena. Esta última contiene, además, cierto número de gases invernadero enteramente antropógenos, como los halocarbonos u otras sustancias que contienen cloro y bromo, considerados en/regulados por el Protocolo de Montreal. Además del  $\text{CO}_2$ , del  $\text{N}_2\text{O}$  y del  $\text{CH}_4$ , el Protocolo de Kyoto considera hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ), hidrofluorocarbonos (HFC) y perfluorocarbonos (PFC).

**Mitigación** - Intervención humana enfocada en reducir las fuentes o potenciar los sumideros de gases de efecto invernadero.

**Forzamiento radiativo ("Radiative forcing")** - Cambio en el flujo radiativo neto (expresado en  $\text{Watts/m}^2$ ), descendente o ascendente, debido a un cambio de un causante externo del cambio del clima, como un cambio en la concentración de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), concentración de aerosoles de volcanes, o el output del Sol.

**Sistema climático** - El sistema climático es un sistema muy complejo que consta de cinco componentes principales: atmósfera, hidrosfera, criosfera, superficie terrestre y biosfera, y de las interacciones entre ellos. El sistema climático evoluciona en el tiempo bajo la influencia de su propia dinámica interna y por efecto de forzamientos externos, como las erupciones volcánicas o las variaciones solares, y de forzamientos antropógenos, como el cambio de composición de la atmósfera o el cambio de uso de la tierra.

## APÉNDICE 2

### Perspectivas, Metodologías, y Métodos de Systems Thinking

La **Tabla 2** presenta una breve explicación de algunas de las principales metodologías y métodos (modelos y técnicas) asociados con las metodologías de *Systems Thinking*. Puesto que la mayoría de los libros y artículos son en el idioma inglés, se ha mantenido la denominación de los metodologías y métodos en su versión en este idioma, indicando solo algunas traducciones al español cuando el nombre de ellas es sustancialmente distinto del nombre en inglés.

Perspectivas de Sistemas / Aspectos de Complejidad	Metodologías de Sistemas	Principales Métodos de Sistemas	Referencias
<p><i>Technical Complexity</i> (Complejidad Técnica)</p>	<p><i>Systems Engineering</i> (SE) – Metodología interdisciplinaria, integrativa y holística para el diseño, uso y retiro de sistemas exitosos “engineered” (ingenieriles) usando principios y conceptos de sistemas y métodos científicos, tecnológicos y de gestión. SE integra múltiples disciplinas en Ingeniería empleando un proceso estructurado que procede desde un concepto inicial a la construcción y operación del sistema.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Analytic and Network Models</i></li> <li>• <i>Agent-Based Models</i></li> <li>• <i>Cellular Automata</i></li> <li>• <i>Computer simulations and testing</i></li> <li>• <i>Monte Carlo Methods</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• INCOSE, 2023.</li> </ul>
<p><i>Process Complexity</i> (Complejidad Procesal)</p>	<p><i>Vanguard Method</i> (VM) – Metodología para obtener cambios positivos en una organización (sistema) y su función; 3-etapas metodológicas: <i>investigar-plan-actuar</i>.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Demand analysis</i></li> <li>• <i>Flow and capability charts</i></li> <li>• <i>Systems and logic pictures</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• OECD, 2017.</li> <li>• Vanguard Software</li> </ul>
<p><i>Structural Complexity</i> (Complejidad Estructural)</p>	<p><i>System Dynamics</i> (SD) – Metodología para el modelaje de procesos complejos de “feedbacks” (bucles de retroalimentación) y la consideración de los impactos de cambios en las interrelaciones de un sistema.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Computer simulations and testing</i></li> <li>• <i>Causal loop diagrams</i> – identifican las relaciones causales y “feedbacks” para comprender los comportamientos de sistemas.</li> <li>• <i>Stock-and-flow diagrams</i> – muestran la acumulación de material o información y su flujo en un sistema.</li> <li>• <i>System archetypes</i> – son estructuras comunes de sistemas que producen comportamientos característicos de los mismos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Meadows, 2009.</li> <li>• Modelling Software – STELLA, <i>iThink</i></li> </ul>
<p><i>People Complexity</i> (Complejidad de Personas/grupos)</p>	<p><i>Soft Systems Methodology</i> (SSM) – Forma organizada de enfocar situaciones problemáticas. Metodología orientada hacia la acción y que organiza el pensamiento con relación a esas situaciones de tal forma que la acción (intervención sistémica) produzca mejoras en el sistema y/o situación problemática.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Rich Pictures</i> – representación / visualización de una situación problemática.</li> <li>• <i>CATWOE</i> – C = customers (clientes/beneficiarios), A = actors (actores, agentes), T = transformation (transformación), W = worldview (cosmovisión), O = owners (propietarios de la intervención), E = environmental constraints (restricciones contextuales).</li> <li>• <i>Conceptual purposive activity models</i> – modelos conceptuales con propósito de las actividades en sistemas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Checkland and Poulter, 2006.</li> </ul>

<p><i>Multi-complexity</i> <i>Multi-dimentional /</i> <i>multi-methodology</i></p> <p>(Multi-complejidad. Multi-dimensional / multi-metodología)</p>	<p><i>Critical Systems Thinking (CST) – Critical Systems Practice (CSP)</i> - Uso creativo de metodologías y métodos en combinación respondiendo a diferentes perspectivas de ser holístico. CSP promueve un enfoque holístico y pragmático que es adecuado al contexto de la situación problemática considerada.</p> <p><i>Systemic Intervention</i> es acción con propósito por parte de un agente (individuo, o grupo de personas, o una organización) a efecto de provocar cambio con reflexión en relación con los límites (“boundaries”) del sistema.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En principio, todos los métodos mencionados; en particular, los siguientes.</li> <li>• <i>Boundary critique/questions</i> – 12 preguntas claves que permiten determinar los límites (“boundaries”) del, y acotar, el sistema y la situación problemática.</li> <li>• <i>Reich Pictures</i> – representación / visualización de una situación problemática.</li> <li>• <i>System Breakdown Structure (SBS)</i> – representación Jerárquica mostrando el ambiente (contexto) y usuarios del sistema.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Jackson, 2024.</li> <li>• Midgley, 2000.</li> </ul>
--	---	--	--

## REFERENCIAS

- Ackoff, R. (1974) *Redesigning the Future – A Systems Approach to Societal Problems*. Wiley, New York.
- Apud, A. (2020) Suitability Analysis and Planning of Green Infrastructure in Montevideo, Uruguay. Tesis en Master of Science (Research) in Sustainable Regional Development. Deakin University, Australia, Universidad ORT Uruguay.
- Apud, A.; Faggian, R.; Sposito, V. and Martino, D. (2020) "Suitability Analysis and Planning of Green Infrastructure in Montevideo, Uruguay". *Sustainability*, 2020,12.9683; doi:10.3390/su1229683.
- Attenborough, D. (2020) *A Life on Our Planet – A Witness Statement and a Vision for the Future*. Witness Books, Penguin Random House, London.
- Barreiro, M.; Arizmendi, F.; Diaz, N. y Trinchin, R. (2021) Análisis del clima y escenarios de cambio y variabilidad climática en Uruguay. Facultad de Ciencias. Online.
- Badgery, W.; Li, G.; Simmons, A. *et al.* (2023) "Reducing enteric methane of ruminants in Australia grazing systems – a review of the role for temperate legumes and herbs". *Crop & Pasture Science*, 74(7-80): 661-679. doi:10.1071/CP22299.
- Bathrellos, G.D.; Gaki-Papanastassiou, K.; Skilodimou, H.D.; Papastassiou, D. and Chousianitis, K.G. (2011) "Potential suitability for urban planning and industry development using natural hazard maps and geological-geomorphological parameters". *Environmental Earth Science*, 66: 537-548, doi: 10.1007/s12665-011-1263-x.
- Bevacqua, E.; Schleussner, C-F. and Zscheischler, J. (2025) "A year above 1.5 signals that Earth is most probably within the 20-year period that will reach the Paris Agreement limit." *Nature Climate Change*. Online: <https://doi.org/10.1038/s41558-025-022446-9>.
- Black J.L.; Davison T.M. and Box, I. (2021) Methane emissions from ruminants in Australia: mitigation potential and applicability of mitigation strategies. *Animals* 11, 951. doi:10.3390/ani11040951.
- Bianchi, L. (2019) *Urban Suitability Modelling and Analysis in Canelones – Uruguay*. Tesis en Master of Science (Research) in Sustainable Regional Development, Deakin University, Australia; Universidad ORT Uruguay.
- Borges. M. (2018) *Climate change and variability impacts on soybean production en Uruguay*. Master of Science (Research) in Sustainable Regional Development. Deakin University, Australia; UdelaR, Uruguay.
- Cannon, A. J. (2025) "Twelve months at 1.5°C signals earlier than expected breach of Paris Agreement threshold". *Nature Climate Change*. Online: <https://doi.org/10.1038/s41558-025-02247-8>.
- Carver, S.J. (1991) "Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems", *International Journal of Geographical Information Systems*, 5(3): 321-339, doi: 10.1080/02693799108927858.
- Checkland, P. and Poulter, J. (2006) *Learning for Action – A Short Definitive Account of Soff Systems Methodology and its use for Practitioners, Teachers, and Students*. Wiley, Chichester.
- Cilliers, P. (1998) *Complexity and Postmodernism: Understanding Complex Systems*. Routledge, Kindle edition.
- Cohen-Shacham, E.; Walters, G.; Janzen, G. and Maginnis, S. (Editors) (2016) *Nature-based Solutions to address global societal challenges*. International Union for the Conservation of Nature and Natural Resources – IUCN, Switzerland. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2016-036.pdf>.

Copernicus Climate Change Service (2024) June 2024 Marks 12th Month of Global Temperature Reaching 1.5°C Above Pre-industrial. Online: <https://climate.copernicus.eu/copernicus-june-2024-marks-12th-month-global-temperature-reaching-15degc-above-pre-industrial>.

Ghofrani, Z.; Sposito, V. and Faggian, R. (2017) "A Comprehensive Review of Blue-Green Infrastructure Concepts". *International Journal of Environment and Sustainability*, 27, 6(1): 15-36 <https://goo.gl/GzS3BX>.

Hansen, J. E.; Kharecha, P.; Sato, M. *et al.* (2025) "Global Warming Has Accelerated: Are the United Nations and the Public Well-Informed?" *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 67:1, 6-44. Online: <https://doi.org/10.1080/00139157.2025.243449>.

Hansen, R.; Hall, E.L.; Chapman, E. and Rolf, W. (2018) Urban Green Infrastructure Planning: A Guide for Practitioners. *Research Gate*, <https://researchgate.net/publication/319967102>.

Hossain, H.; Hood, A.; Sposito, V. and Cook, S. (2003) Strategic Regional Planning: mixing data, experts and GIS. 23<sup>rd</sup> ESRI International User Conference Proceedings, San Diego, USA.

Hossain, H. (2005) Urban Buildability. CUPUM 05: Computers in Urban Planning and Urban Management, 9th International Conference Proceedings, London, U.K.

INCOSE - International Council on Systems Engineering (2023) *Systems Engineering Handbook*. Online: [www.incose.org](http://www.incose.org). Ver también: INCOSE. Systems Engineering Handbook – A Guide for Systems Life Cycle Processes and Activities, Version 5

IPCC (2021a) *Climate Change 2021- The Scientific Basis - Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Online: [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch).

IPCC (2021b) *Cambio Climático 2021 – Bases Físicas - Resumen para responsables de políticas*. Contribución de Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio de Clima. Online: [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch).

IPCC (2022) *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Online: [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch).

IPCC (2023) *Summary for Policymakers*. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

Jackson, M.C. (2024) *Critical Systems Thinking – A Practitioners' Guide*. Wiley, Hoboken.

Koomen, E.; de Moel, H.; Steingröver, E.G.; van Rooij, S.A.M. and M. van Eupen, M. (2012) *Land Use and Climate Change*. Technical Report, National Research Program Climate Changes Spatial Planning. Online: <https://goo.gl/AkLs1B>.

McHarg I. L. (1992) *Design with Nature*. 25<sup>th</sup> anniversary edition, Wiley.

Meadows, D.H. (2008) *Thinking in Systems – A Primer*. Edited by D. Wright Sustainability Institute. Chelsea Green Publisher, Vermont.

Mesorio, G. (2023) "Hidrogeno". *Ingenieria*, 98: 12-17. Asociación de Ingenieros del Uruguay, Montevideo.

Midgley, G. (2000) *Systemic Intervention – Philosophy, Methodology, and Practice*. Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York.

Ministerio de Ambiente (2024) Lanzamiento de un proyecto para la Cuenca del Santa Lucia. Comunicación del Ministerio de Ambiente 13/05/2024. MdA, online.

Ministerio de Ambiente, SNRCC Uruguay (2023) *Estrategia Climática a Largo Plazo – Para un Desarrollo Bajo de Gases de Efecto de invernadero y Resiliencia al Clima*. Online: Ministerio de Ambiente.

Ministerio de Ambiente, Oficina de Planeamiento y Presupuesto, et al. (2023) *Plan Nacional de Aguas Pluviales Urbanas para Uruguay*. Ministerio de Ambiente. MdA, online.

Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (2019) *Plan Nacional de Adaptación a la Variabilidad y el Cambio Climático para el Sector Agropecuario de Uruguay (PNA-Agro)*. Online: <https://www4.unfccc.int/sites/PNAC/Documents/Parties/PNA%20Agriculture%20Uruguay.pdf>

Ministerio de Industria, Energía y Minería – MIEM (2023) *Hoja de Ruta del Hidrogeno Verde y derivados en Uruguay*. Online: [www.miemgob.uy](http://www.miemgob.uy) | [www.hidrogenoverde.uy](http://www.hidrogenoverde.uy).

Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA) (2019) *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático en Ciudades e Infraestructuras (NAP Ciudades) - Breve Guía Para Entender el Cambio Climático*. MVOTMA, online.

OECD (2017) *Systems Approaches to Public Sector Challenges: Working with Change*. OECD Publishing, Paris.

Perroni, A.; Ferres, F.; Mercant, J.; Bastarrica, F.; Irrazabal, G.; Estrada, I., Di Chiara, L.; Mullin, S. y Amorín, C. (2024) Factores habilitantes para el desarrollo del Hidrogeno Verde en Uruguay – Infraestructura, recurso hídrico y maraco normativo. Observatorio de Energía y Desarrollo Sustentable de la Universidad Católica de Uruguay, Online.

Pittock, A. B. (2009) *Climate Change – The Science, Impacts and Solutions*. 2<sup>nd</sup> edition. CSIRO Publishing, Melbourne.

Riahi, K.; Van Vuuren, D.P., Kriegler, E. et al. (2017) “The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview”. *Global Environmental Change* 42(2017): 153-168. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.

Rittel, H.W.J. and Weber, M.M. (1981) “Dilemmas in a general theory of planning”. In: *Systems Thinking*. Editor F.E. Emery. 2<sup>nd</sup> edition, Penguin.

Rodenas, M.A. and Jackson, M.C. (2024) “Lessons for systems engineering from the Segura River reclamation project: A Critical systems analysis”. *Systems Research and Behavioral Science*, 38:368-376. DOI: 10.1002/sres.2789.

Rohde, R. (2024) 2024 Temperature Update. Berkeley Earth, 2024. Online: <https://berkeleyearth.org/june-2024-temperature-update/>

Saaty, T.L. (1977) “A scaling method for priorities in hierarchical structures”. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3): 234-281, doi: 10.1016/00222496(77)90033-5.

Saaty, T.L. and Vargas, L.G. (1991) *Prediction, Projection and Forecasting*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Sposito, V.A. (2021a) *Systems Thinking – Foundations, Perspectives. Methodologies, Methods, and Practice*. Faculty of Science, Engineering and Built Environment, Deakin University, Melbourne.

Sposito, V.A. (2021b) *Strategic Thinking, Strategic Planning and Decision-Making*. Faculty of Science, Engineering and Built Environment, Deakin University, Melbourne.

Sposito Acquistapace, V. (2023) 'Planificación estratégica aplicada a la producción de hidrogeno – Clústeres verdes como Proyectos Estratégicos'. *Ingeniería*, 99: 58-65. Asociación de Ingenieros del Uruguay, Montevideo.

Sposito Acquistapace, V. (2024a) "Planificación estratégica aplicada a la construcción de infraestructura azul-verde". *Ingeniería*, 100: 70-82. Asociación de Ingenieros del Uruguay, Montevideo.

Sposito Acquistapace, V. (2024b) *Bosquejo de una estrategia de desarrollo sostenible regional en Uruguay – Hacia 2050*. Web de la Academia Nacional de Ingeniería del Uruguay. Online.

Sposito Acquistapace, V. (2025 – forthcoming) "Systems Thinking aplicado a problemas complejos en Ingeniería". *Ingeniería*. Asociación de Ingenieros del Uruguay, Montevideo.

Sposito, V.; Faggian, R.; Diogo, V. and Romeijn, H. (2014) Blue-Green Infrastructure for Creating Resilient Regions to Climate Change – A Case Study in the Gippsland Region, Victoria, Australia. The University of Melbourne, Deakin University, SPINLab Department of Economics - Vrije Universiteit Amsterdam.

United Nations (2016) *Transforming Our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. Online: [sustainabledevelopment.un.org](https://sustainabledevelopment.un.org).

World Bank (2021) A Catalogue of Nature-based Solutions for Urban Resilience. Online

World Bank (2024) Climate Change Knowledge Portal (CCKP). Ver: Use Manual CCKP. Online.