

CENARIZAÇÃO DO CLIMA FUTURO

PROPOSTA METODOLÓGICA PARA A INCORPORAÇÃO DO RISCO CLIMÁTICO NAS ESTRATÉGIAS DE NEGÓCIOS DA NEOENERGIA

Apoio ao Projeto Piloto de Adaptação da TERMOPE

G. LUIGI - Lima/COPPE/UFRJ



EQUIPE CENTRO CLIMA

NOME	FUNÇÃO	QUALIFICAÇÃO
Emilio Lèbre La Rovere	Coordenador do projeto	Professor Titular do Programa de Planejamento Energético - PPE/COPPE/UFRJ (D.Sc)
Claudio Freitas Neves	Processos costeiros	Professor Associado do Programa de Engenharia Oceânica e Costeira - PENO/COPPE/UFRJ (Ph.D)
Heliana Vilela de Oliveira Silva	Metodologia de adaptação	Pesquisador Sênior do Centro Clima (D.Sc)
Denise da Silva de Sousa	Metodologia de adaptação	Pesquisador Sênior do Centro Clima (D.Sc)
Giovannini Luigi	Cenarização do clima	Pesquisador Sênior do Centro Clima (D.Sc)
Silvia B. Schaffel	Incorporação do risco climático na estratégia de negócios	Pós-doutoranda do PPE (D.Sc)
Jônatas Cavalcanti Teixeira	Estagiário	Graduando em Engenharia Ambiental da Poli/UFRJ
Fundação Coppetec	Administração financeira, legal e contábil	-

SUMÁRIO

- **Conceitos**
 - Tempo x clima x extremos do clima
 - Variabilidade x mudança
 - Previsão x projeção
- **O clima como se apresenta**
- **Modelando o clima**
 - Aspectos gerais
 - O que nos dizem os modelos
 - Modelo globais x regionais
 - Cenários de emissão de GEE – RCP
 - Incertezas
 - Modelagem do clima - INPE
- **Modelagem/cenarização - UHE, Eólicas, Transmissão e UTE**



CONCEITOS

TEMPO X CLIMA X EXTREMOS DO CLIMA

Tempo

- Condição complexa e mutável da atmosfera em escala temporal de minutos a até, no máximo, 15 dias. Trata-se do tempo atual ou tempo a ser previsto pelos meteorologistas

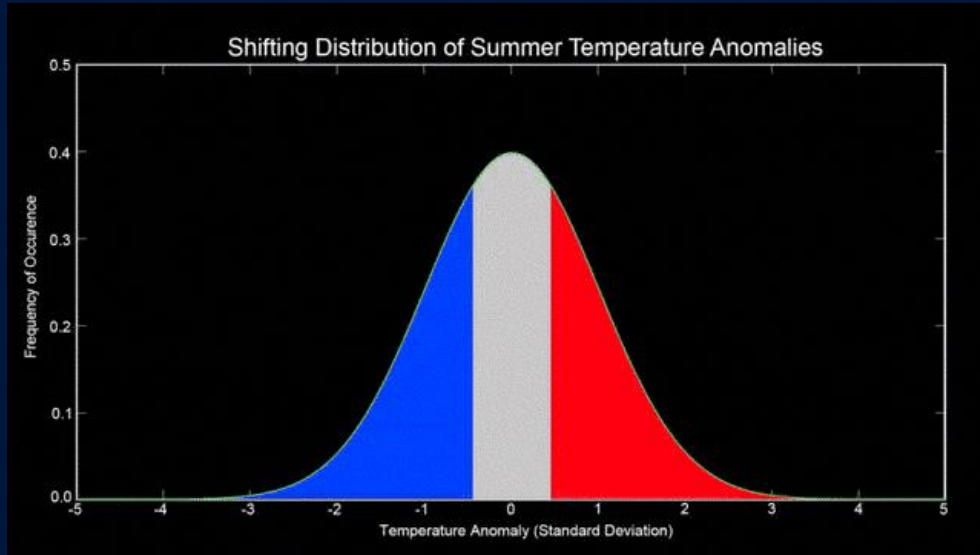
Clima

- Síntese do tempo de um lugar para um período aproximado de 30 anos (OMM)
- Em termos estatísticos, seria a média e variabilidade ao longo de um período de tempo (meses a milhares ou milhões de anos)

PARA UM DADO LOCAL, O ESTADO DA ATMOSFERA PODE SER DESCRITO EM TERMOS **INSTANTÂNEOS** - CONDIÇÃO ATUAL, EXTREMAMENTE DINÂMICA -, E **ESTATÍSTICOS** - CONDIÇÃO MÉDIA, DESCRIÇÃO ESTÁTICA

Evento meteorológico extremo

- Evento tão ou mais raro do que o percentil 10 ou 90 de uma FDP
- Em sentido absoluto, condições meteorológicas extremas podem variar de local para local

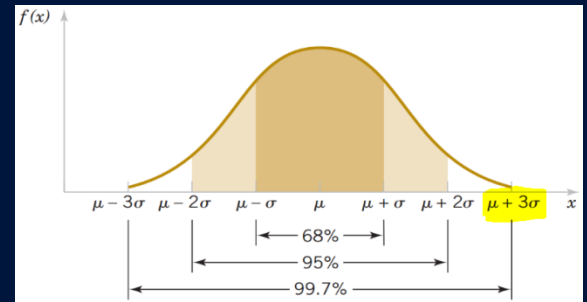
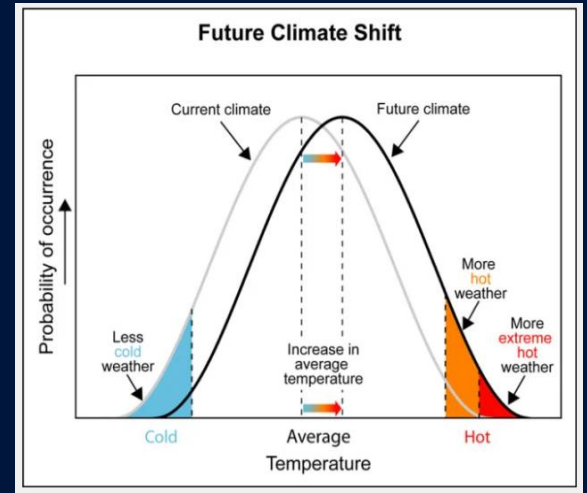


<https://bioenergyigert.wordpress.com/2012/09/05/shifting-or-stretching-the-climate-bell-curve/>

Frequência

Achatamento – elevação da média

Deslocamento μ para a direita



VARIABILIDADE x MUDANÇA



Variabilidade climática

Variação no estado médio e outras estatísticas do clima (desvio-padrão, ocorrência de eventos climáticos extremos etc.)

- Variabilidade interna → Naturais do sistema climático
- Variabilidade externa (*fingerprinting studies*) → Variações no forçamento externo antropogênico ou natural

Mudança climática

Resultado da variabilidade interna e externa do sistema climático terrestre

- Opera por décadas ou mais
- Podem ser causadas por fatores naturais ou antrópicos que modificam os componentes do balanço de radiação terrestre

“Esses eventos não são apenas um exemplo do que as mudanças climáticas podem trazer: são causados pelas mudanças climáticas. As chances de que a variabilidade natural tenha criado tais extremos são mínimas”

Onda de calor – Europa, 2003

Onda de calor – Rússia, 2010

Seca – Texas e Oklahoma, 2012

James E. Hansen – Diretor da NASA Instituto Goddard de Pesquisas Espaciais (Washington Post, 2012)

PREVISÃO x PROJEÇÃO

Previsão

Os modelos numéricos são utilizados para prever condições de **tempo** ou **climáticas** num horizonte de tempo futuro, a partir de uma dada condição inicial

Projeção

Os modelos numéricos são utilizados para representar o **clima** com base em cenários supostos para o futuro. Exemplos:

- Diferentes taxas de emissão de GEE
- Diferentes forçantes radiativas (ex. RCP 4.5W/m²)

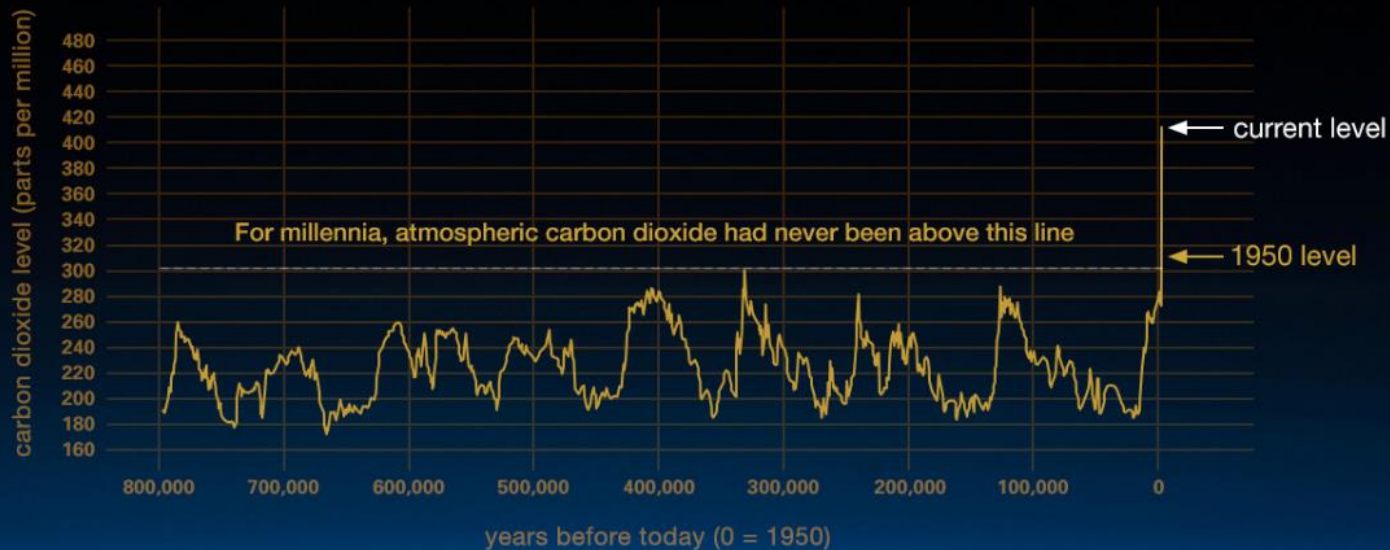


O CLIMA COMO SE APRESENTA

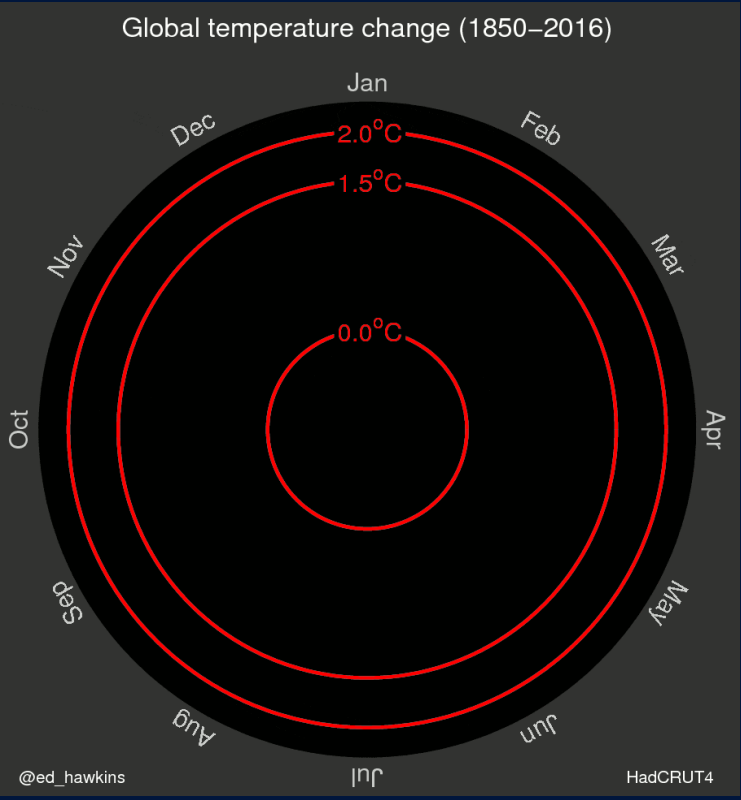


Elevação da concentração do CO₂ atmosférico desde a revolução industrial

<https://climate.nasa.gov/evidence/>

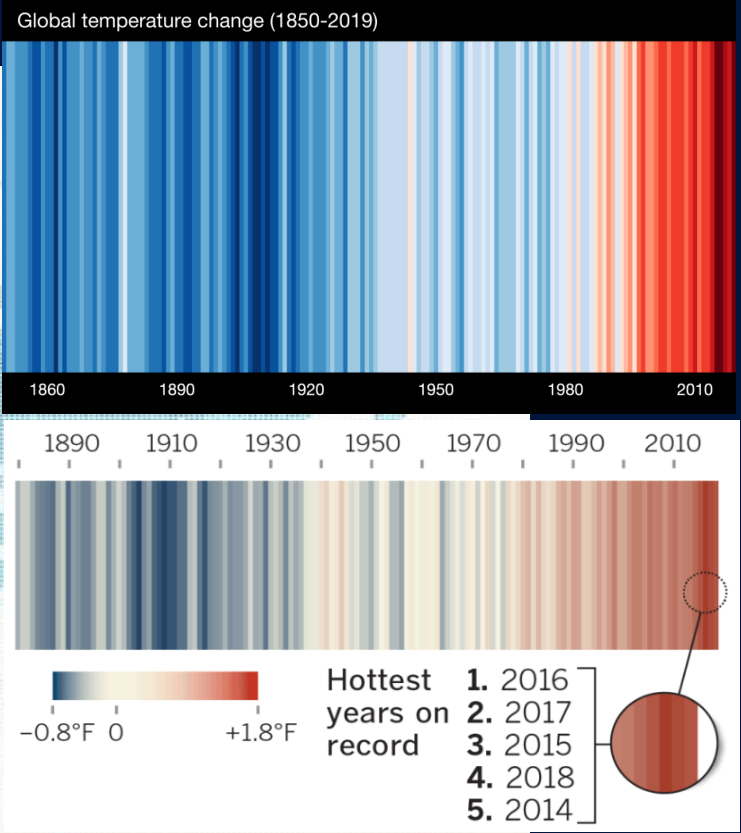
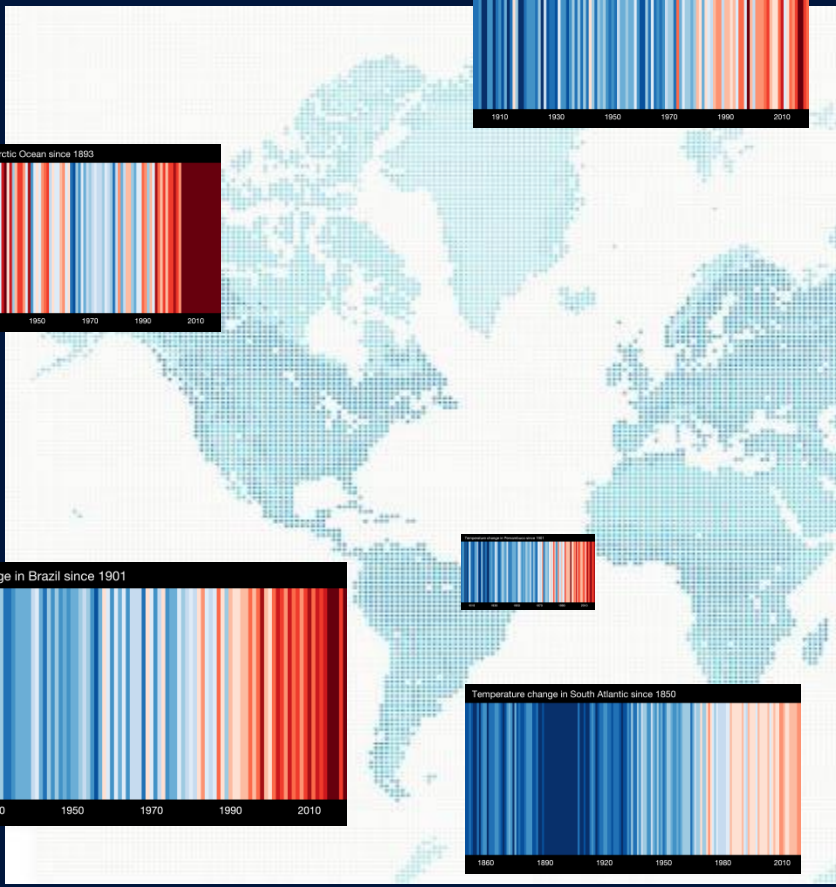


O CLIMA COMO SE APRESENTA



<https://www.youtube.com/watch?v=wXrYvd-LBu0>

O CLIMA COMO SE APRESENTA

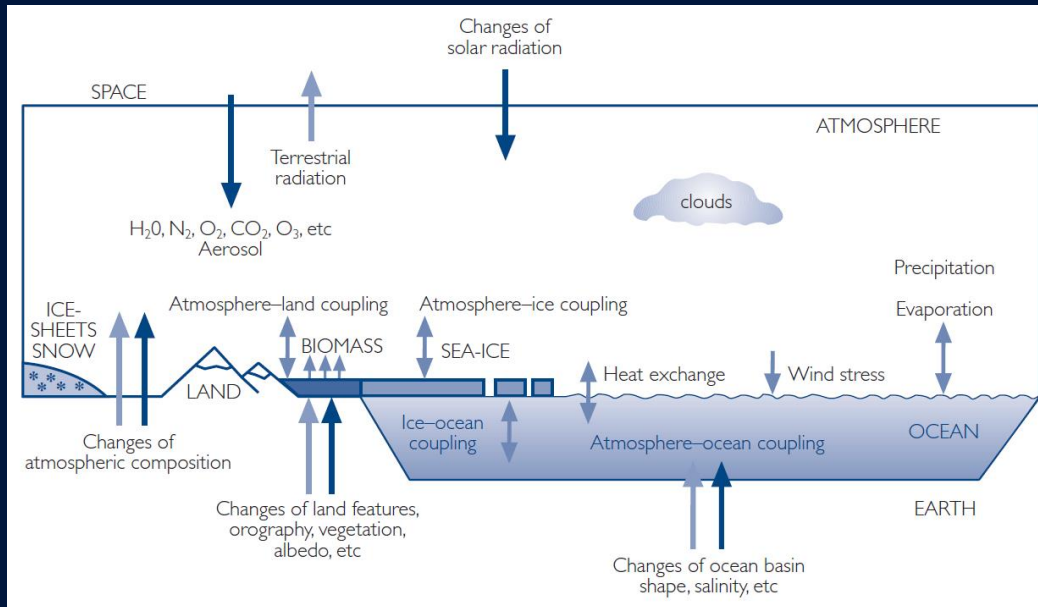


Ed Hawkins (University of Reading) - <https://showyourstripes.info/> (2020)





MODELANDO O CLIMA

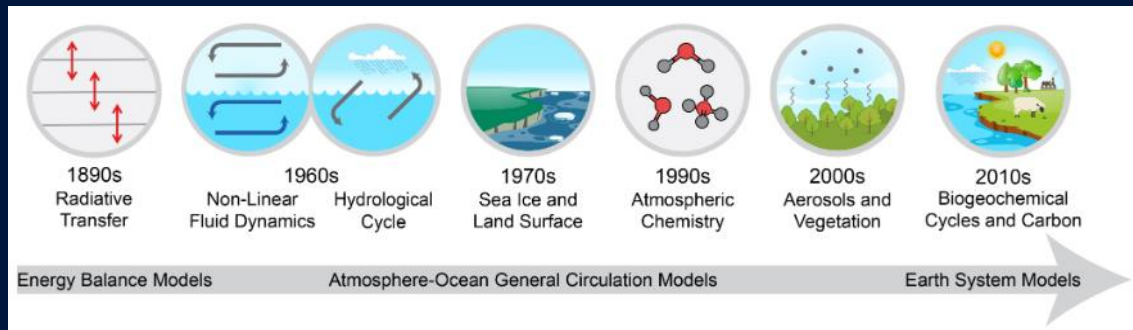


Sistema acoplados – Componentes do sistema atmosfera/terra/oceano

CLIMATE LAB BOOK (2018)

- Desempenho computacional aumentado → Modelos mais complexos, com mais componentes acrescentados (e.g., dinâmica dos oceanos, as trocas na superfície da terra e os aerossóis)

<https://science2017.globalchange.gov/chapter/4/>



CSSR, 2018

Linha do tempo – Evolução da abordagem dos modelos

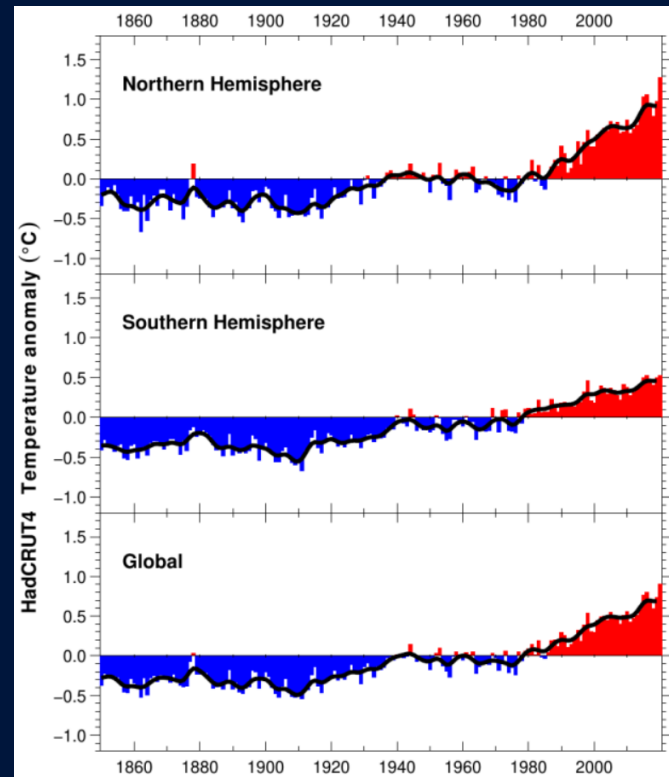
O QUE NOS CONTAM OS MODELOS



- Todos os modelos simulam elevações na temperatura global no presente século
- Maior aquecimento na terra x oceanos
- Regiões polares mais aquecidas
- Verões mais quentes e prolongados

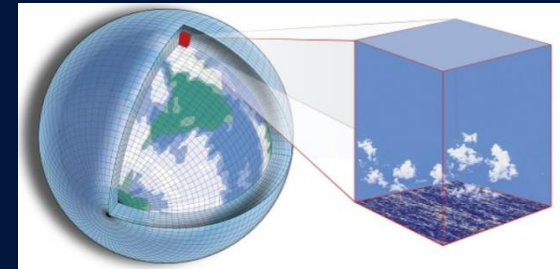


- Maior complexidade
- Divergência:
 - Padrões
 - Tendência da mudança, em alguns lugares
- As mudanças não serão uniformes no mundo → regiões mais secas x úmidas

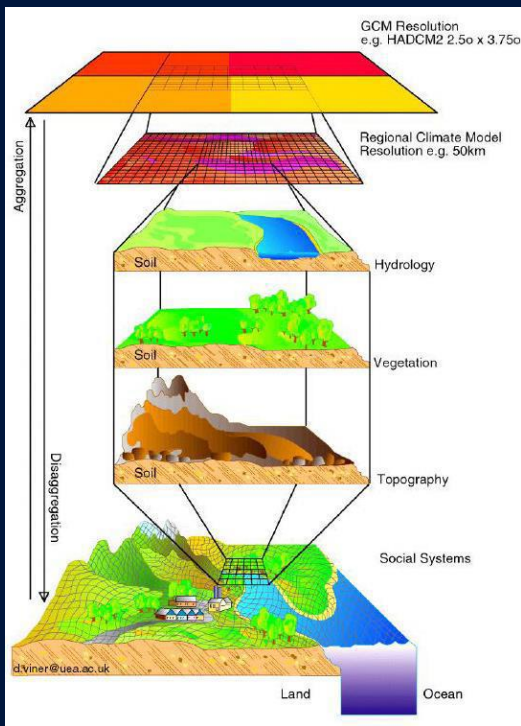


MODELOS GLOBAIS

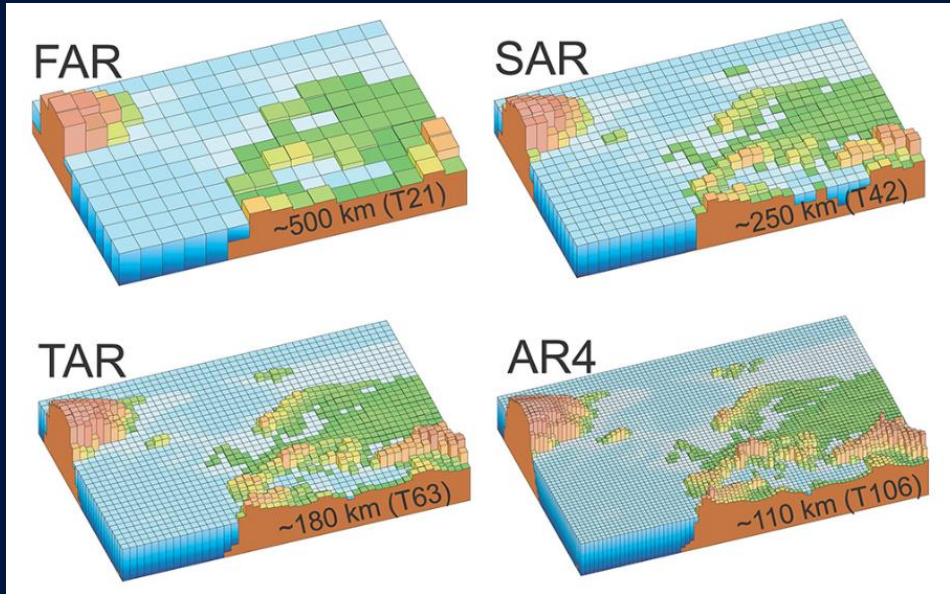
- As células da grade de modelos globais são da ordem de 100 a 300 km² → Ainda assim, fornecem uma boa ideia de como as mudanças podem se manifestar em grande escala
- Simulam bem:
 - Os padrões de variabilidade sazonal, interanual e intrasazonal
- Simulam mal:
 - Processos de escala subgrade (mesoescala), que produzem padrões climáticos regionais:
 - Topografia
 - Cobertura da superfície
 - Processos convectivos úmidos
 - Forma da costa dos continentes etc.
- Avaliação dos modelos climáticos:
 - Capacidade de simular o clima atual e passado com relação às condições médias e suas variações
 - Os mais plausíveis conseguem simular bem o clima do século XX até o presente



MODELOS REGIONAIS – Resolução espacial



LYRA (2018)



Evolução da resolução espacial de modelos do clima futuro conforme relatórios do IPCC

<https://www.carbonbrief.org/qa-how-do-climate-models-work>

MODELOS REGIONAIS

- **Escala mais refinada** → possibilidade de utilizar parametrizações físicas mais apropriadas para resolver processos de meso e micro escala, com redução de erros observados em grades de baixa resolução espacial
- Representam, de forma mais realística, as características da linha de costa, topografia, solo, vegetação e processos atmosféricos de menor escala
- Auxiliam na compreensão dos possíveis impactos das mudanças climáticas sob diferentes cenários de emissões → fundamental para estudos dos impactos e identificação de medidas de mitigação e adaptação
- **Melhor a resolução espacial/temporal para setores** como agricultura, segurança alimentar, hidrologia, recursos energéticos, economia, doenças
- **Simulação do complexo sistema climático** → requer grande quantidade de recursos computacionais → restrições associadas ao número de cálculos e, conseqüentemente, do tamanho da grade

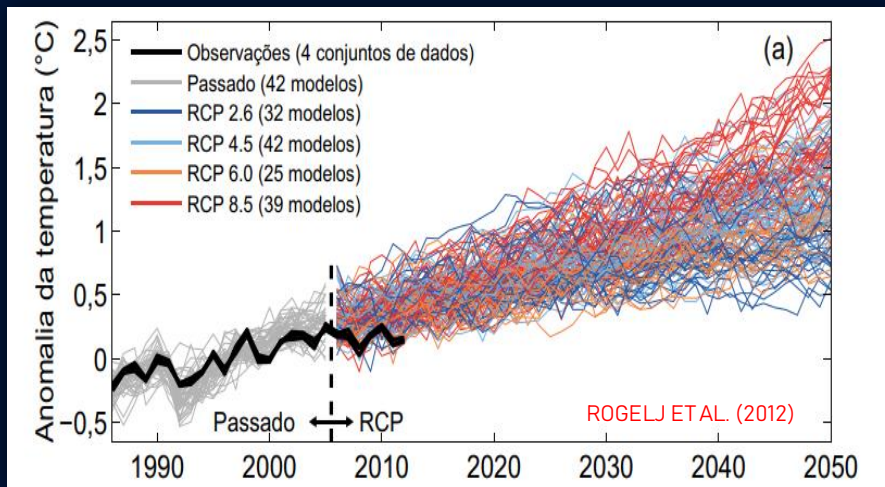
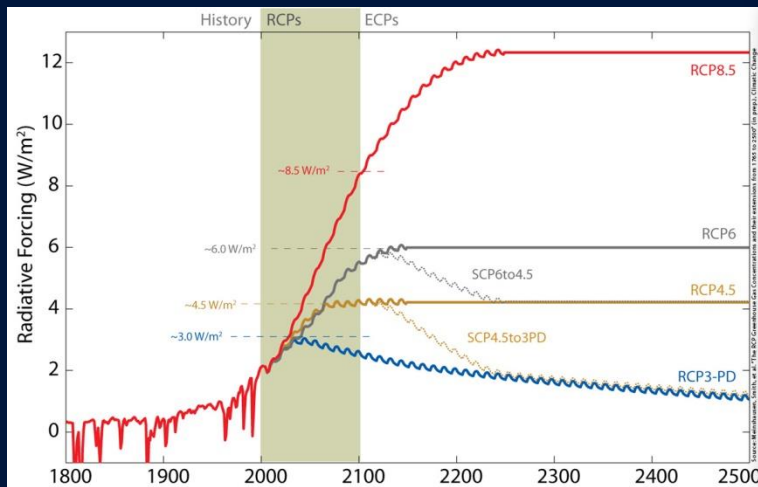


CAMINHOS REPRESENTATIVOS DE CONCENTRAÇÃO - RCP

- Emissão e concentração de GEE
- Alterações demográficas, socioeconômicas e tecnológicas
- Uso da terra
- Decisões sobre a produção de energia - Matriz energética
- Políticas para o clima

Trajetórias futuras de desenvolvimento

Projeção da forçante radiativa e temperatura média global de projeções referente a 1986-2005



CAMINHOS REPRESENTATIVOS DE CONCENTRAÇÃO - RCP

Alterações projetadas em relação ao período 1986-2005

Premissas:

- As emissões seguem as vias de concentração especificadas (RCP)
- Os modelos climáticos preveem com precisão a quantidade de aquecimento no século XXI
- A variabilidade solar segue a do final do século XX, que coincidiu com o Grande Máximo Solar (1985-2005)
- A variabilidade interna natural da circulação oceânica não afeta a temperatura ou o aumento do nível do mar nessas escalas de tempo
- As principais erupções vulcânicas não são consideradas

		2046–2065		2081–2100	
	Cenário	Média	Intervalo provável ^f	Média	Intervalo provável ^f
Alteração da Temperatura Média Global da Superfície (°C) ^a	RCP2.6	1,0	0,4 a 1,6	1,0	0,3 a 1,7
	RCP4.5	1,4	0,9 a 2,0	1,8	1,1 a 2,6
	RCP6.0	1,3	0,8 a 1,8	2,2	1,4 a 3,1
	RCP8.5	2,0	1,4 a 2,6	3,7	2,6 a 4,8
	Cenário	Média	Intervalo provável ^d	Média	Intervalo provável ^d
Aumento Global Médio do Nível do Mar (m) ^b	RCP2.6	0,24	0,17 a 0,32	0,40	0,26 a 0,55
	RCP4.5	0,26	0,19 a 0,33	0,47	0,32 a 0,63
	RCP6.0	0,25	0,18 a 0,32	0,48	0,33 a 0,63
	RCP8.5	0,30	0,22 a 0,38	0,63	0,45 a 0,82

Emissões cumulativas de CO₂ (CMIP5)

Cenário	Emissões cumulativas de CO ₂ de 2012 a 2100 ^a			
	GtC		GtCO ₂	
	Média	Intervalo	Média	Intervalo
RCP2.6	270	140 a 410	990	510 a 1505
RCP4.5	780	595 a 1005	2860	2180 a 3690
RCP6.0	1060	840 a 1250	3885	3080 a 4585
RCP8.5	1685	1415 a 1910	6180	5185 a 7005

Notas:

^a 1 Giga tonelada de carbono = 1 GtC = 10¹⁵ gramas de carbono. Isto corresponde a 3667 GtCO₂.

<https://judithcurry.com/2019/03/11/hurricanes-climate-change-21st-century-projections/>

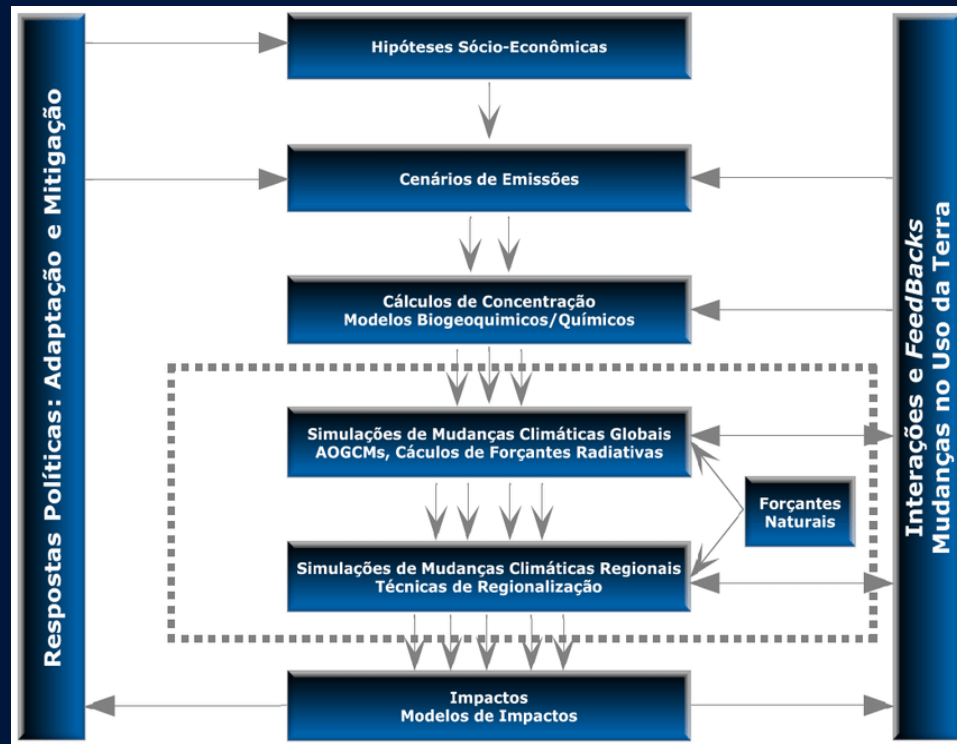
INCERTEZAS

- Variabilidade interna do sistema climático
- Limitação dos modelos climáticos
- Incerteza relativa às forçantes passadas, presentes e futuras do sistema climático por agentes forçantes naturais e antropogênicos (GEE, aerossóis, forçantes solares e mudanças no uso da terra)
- Resposta do sistema climático aos agentes forçantes (sensibilidade climática)

Além disso:

- Desenvolvimento tecnológico
- Consumo de energia
- Fatores socioeconômicos
- Resposta política (A & M)
- Impactos (retroalimentação negativa)

Opções: seleção de melhores modelos, *ensemble* (inter e intra modelos), correção de viés etc.



TORRES (2014)

MODELOS REGIONAIS - INPE

Modelos

- Eta/BESM - Eta/CanESM2
- Eta/HadGEM2-ES (HadGEM2-ES - *Hadley Centre*, Grã Bretanha)
- Eta/MIROC5 (MIROC5 - *University of Tokyo*)

Períodos de integração

- Presente: 1961-2005 (período de integração mais comum: 1961-1990)
- Projetado: 2006-2100 (períodos de integração mais comuns: 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100)

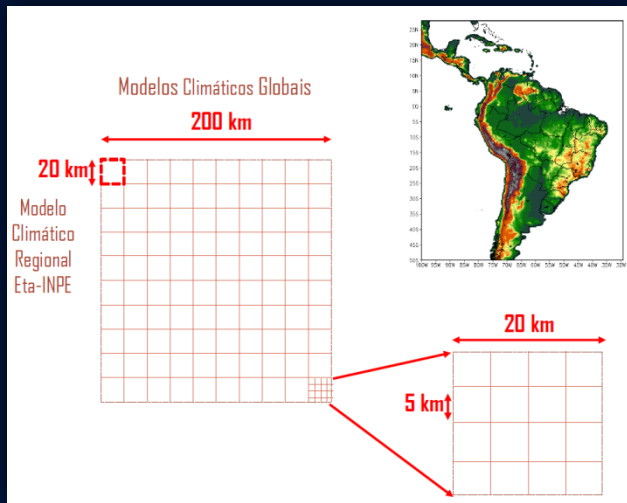
Escala/resolução espacial

- 5 km - Parte da Região Sudeste do BR (mapa)
- 20 km - Caribe e América do Sul + oceano adjacente (mapa)

Cenários de emissão de GEE

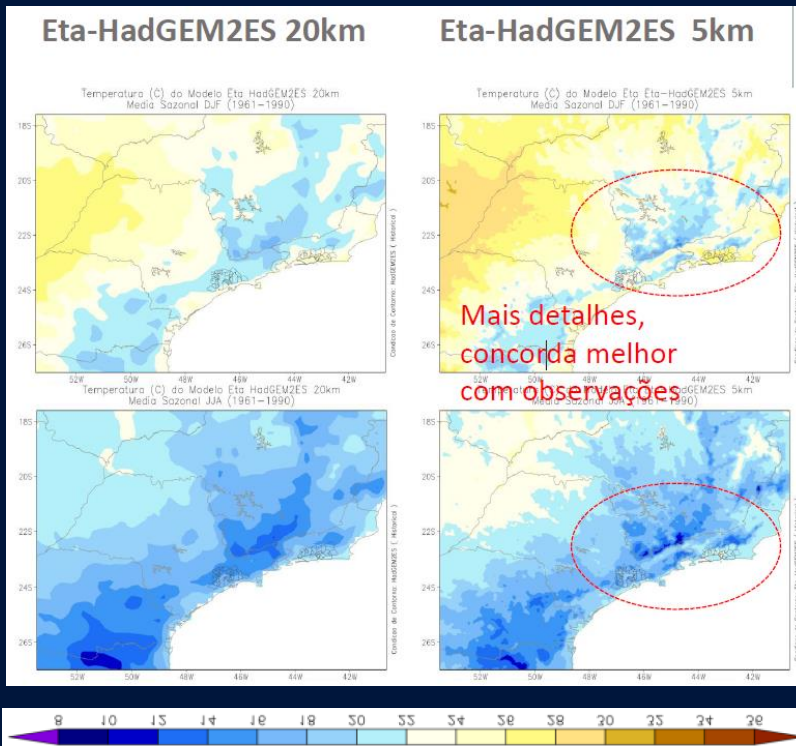
- RCP 4.5 - RCP 8.5

MODELOS REGIONAIS - INPE



LYRA (2018)

LYRA (2018)



TEMPERATURA

LYRA (2018)

MODELOS REGIONAIS - INPE

PROJETA PROJEÇÕES DE MUDANÇA DO CLIMA PARA A AMÉRICA DO SUL
REGIONALIZADAS PELO MODELO ETA

Home > Dashboard

1º Passo Escolha dos dados

2º Passo Visualização da área selecionada

3º Passo Dados cadastrais do usuário

4º Passo Concluir requisição

Escolha o cenário climático, frequência e demais dados necessários

Cenário Climático **i** 20 km, RCP4.5, continental, MIROC5.

Frequência **i** ANUAL

Localização **i** Por ponto

Formato do arquivo dos dados **i** CSV

Variável

Mês Inicial Ano Inicial **i** Mês Final Ano Final **i** Latitude **i** Longitude **i**

Janeiro 2006 Dezembro 2006 -12.40 -49.80

i Prezado usuário, recomenda-se realizar requisições de conjuntos pequenos. Salienta-se que os dados corrigidos são apenas sobre o continente.

Próximo **i**



MODELAGEM/CENARIZAÇÃO

UHE
EÓLICA
TRANSMISSÃO
UTE

USINAS HIDRELÉTRICAS

- Uma abordagem comum para avaliar as condições futuras da vazão: uso de projeções de modelos
- Etapas:
 - 1) Avaliação da **performance de modelos globais** do CMIP5/AR5 → melhor representação da precipitação sobre a bacia. Correção estatística e remoção de viés. Cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 e *timeslices* 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100
 - 2) Seleção dos **modelos** a partir do critério de avaliação descrito anteriormente
 - 3) **Variáveis meteorológicas**: precipitação pluviométrica, temperatura média, máxima e mínima, evapotranspiração potencial, umidade relativa do ar → **padrões de variabilidade e mudanças no clima**
 - 4) **Modelagem hidrológica** para a geração de séries de vazões → avaliar o impacto das mudanças de clima sobre a hidrologia das bacias (e.g., SMAP → Lopes et al., 1981)
 - 5) **Demanda presente e futura** → avaliar cenários relacionados a:
 - Mudanças de clima sob condições de demanda presente
 - Projeções de demanda futura sob condições de clima presente
 - Mudanças combinadas de clima e demanda futuros

USINAS HIDRELÉTRICAS

Interpolação de dados

- Modelagem geoestatística → *Geostatistical Analyst, software ArcGIS*
- Interpolação da grade regular com base na krigagem ordinária

Estressores

- Temperatura do ar
- Insolação
- Evapotranspiração
- Precipitação pluviométrica
- Umidade do ar
- Estiagem/seca
- Vento
- Onda (reservatório)

Modelo climatológico

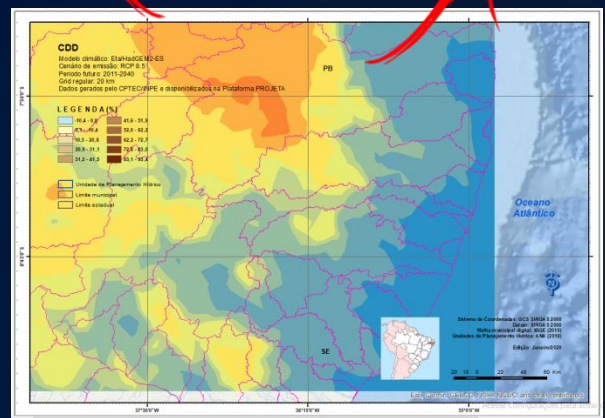
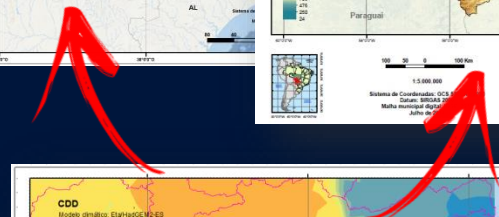
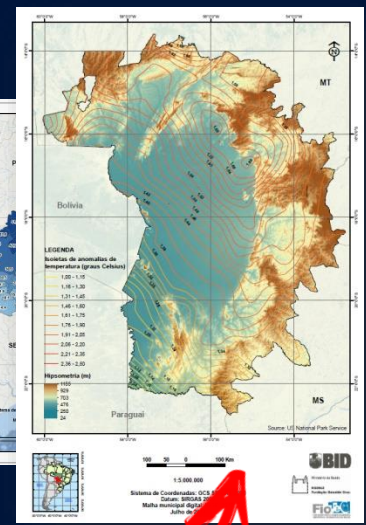
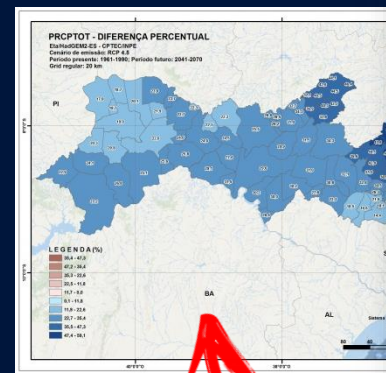
- Modelo regional de circulação (BRAMS, INPE)

Modelo hidrológico

- ANA, NOS, IGAM, MGB-IPH, SMAP

Modelo geração ondas

- SWAM



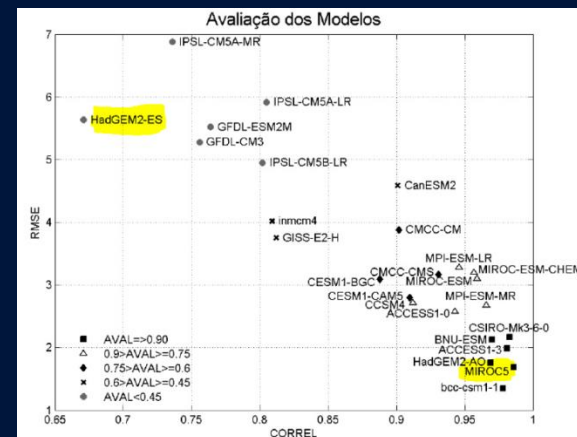
USINAS HIDRELÉTRICAS

ADAPTAÇÃO DO PLANEJAMENTO E DA OPERAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS À VARIABILIDADE E MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BACIA ESTENDIDA DO SÃO FRANCISCO – Nóbrega et al., (2015)

- Precipitação pluviométrica, temperatura média, máxima e mínima, evapotranspiração potencial
- Modelos globais do CMIP 5 (AR5/IPCC) → seleção de 25 modelos
- RCP 4.5 e RCP 8.5; 2011-2100
- Modelo hidrológico para transformação chuva-vazão: SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*)
- Possíveis impactos na disponibilidade hídrica → aumento de temperatura e de redução da precipitação

ADAPTAÇÃO DO PLANEJAMENTO E DA OPERAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS À VARIABILIDADE E MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BACIA ESTENDIDA DO SÃO FRANCISCO – Silveira et al. (2016)

- Precipitação e temperatura
- Modelos globais do CMIP 5 (AR5/IPCC) → Seleção de 25 modelos mais aderentes a dados observados (INMET) – sazonalidade da precipitação pluviométrica
- RCP 4.5 e RCP 8.5; 2011-2100
- Tendência positiva para a temperatura; divergem quanto a precipitação (anomalias entre -20% e 20%) → alto nível de incerteza



USINAS HIDRELÉTRICAS

PROJEÇÕES CLIMÁTICAS REGIONALIZADAS PARA O ESTADO DO TOCANTINS, BRASIL, NOS CENÁRIOS RCP 4.5 E RCP 8.5 - Chou et al (2019)

- Precipitação, evapotranspiração real, temperaturas (média, máxima e mínima) e umidade relativa
- Eta/HadgEM2-ES e Eta/MIROC5; Grade 20 km; RCP 4.5 e RCP 8.5; 2011-2100
- **Possíveis impactos na disponibilidade hídrica → aumento de temperatura e de redução da precipitação**

NUMERICAL SIMULATIONS OF PRECIPITATION AND STREAMFLOW IN CURRENT CLIMATE AND FUTURE PROJECTIONS TO DRAINAGE AREAS OF BRAZILIAN HYDROELECTRIC PLANTS - Silva et al. (2020)

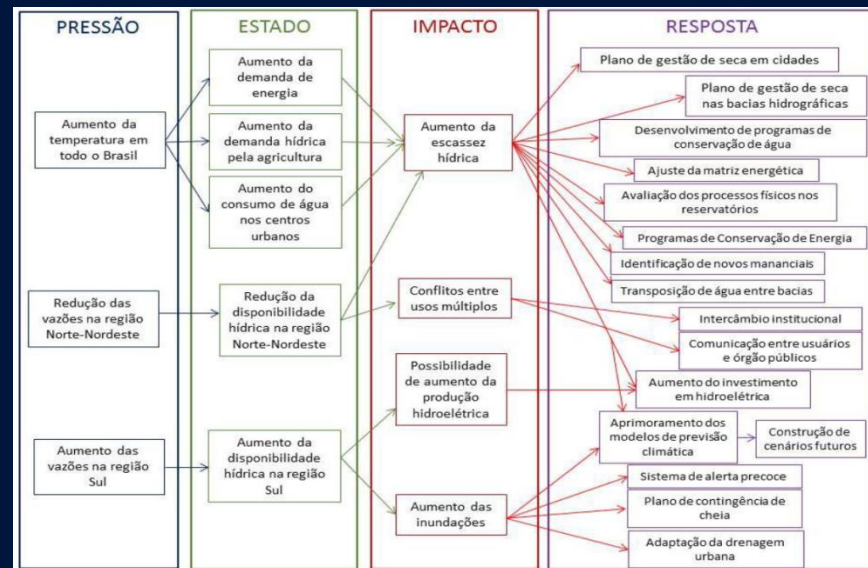
- Precipitação pluviométrica (ANA), temperatura (INMET) e vazão (ONS)
- Eta/HadgEM2-ES e Eta/MIROC5; Grade: 20 km; RCP 4.5 e RCP 8.5; 2011-2100
- Modelo hidrológico para transformação chuva-vazão: SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*)
- Correção de viés com dados observados de precipitação
- **Reduções projetadas nas chuvas/vazão são a continuação de um processo que já foi observado no presente clima**
- **Os cenários consideram apenas possíveis mudanças na dinâmica climática e não as influências do uso consuntivo da água, mudanças no uso da terra ou socioambientais e medidas de política econômica**

BRASIL 2040 – RECURSOS HÍDRICOS – Fundação Cearense de Pesquisa e Cultura (FCPC/UFC), 2015

- Precipitação pluviométrica e evapotranspiração (24 bacias)
- Regionais: Eta/HadgEM2-ES e Eta/MIROC5; RCP 4.5 e RCP 8.5; 2011-2100
- Modelo hidrológico para transformação chuva-vazão: SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*) e regressão lineares mensais a partir de dados de Postos Bases
- Correção de viés com dados numéricos do INPE para precipitação
- Análise das vazões/ENA por anomalias (diferença entre vazão/ENA calculada para os climas atual e futuro) → atenuação da influência da modelagem hidrológica e das regressões na cascata de modelos (incertezas)

○ **Resultados:**

- O impacto das MC nas vazões/ENA indica tendência de aumento na RS e redução nas regiões NE e N
- Riscos que demandam ações preventivas – **lógica proativa** –, para redução das vulnerabilidades dos sistemas e populações
- Romper com a inércia ! Medidas devem sinalizar ações de gestão da oferta e demanda e fiscalização/redução de conflitos de uso, frente à realidade marcada pela incerteza e complexidade



EÓLICAS

- O vento é muito variável geográfica e temporalmente. Diferentes aspectos afetam intensidade, direção e sentido:
 - Condições do solo, presença de obstáculos (inclusive aerogeradores ...)
 - Vegetação
 - Cobertura de nuvens, insolação
 - Altitude/topografia



**Performance
modelos globais x
regionais !!**

Rugosidade
Absorção/reflexão luz solar

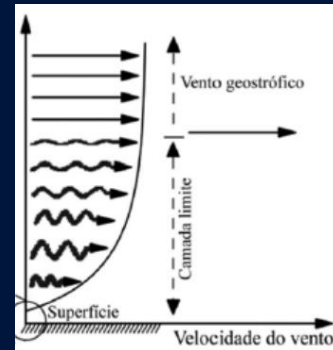
Estressores

- Temperatura do ar
- Insolação
- Evapotranspiração
- Precipitação pluviométrica
- Estiagem/seca
- Vento
- Umidade do ar

Modelagem

- Modelo regional de circulação para a região do reservatório (BRAMS, FUNCEME, INPE)

PICOLO et al., (2014)



TRANSMISSÃO

- Altas temperaturas e as ondas de calor → limitam a capacidade de transferência de linhas de transmissão e aumentam as perdas de energia
- Chuva e inundações → equipamentos da subestação

Estressores

- Temperatura do ar (aumento gradual)
- Temperatura extrema (baixa e alta)
- Evapotranspiração
- Precipitação pluviométrica
- Estiagem/seca
- Vento
- Umidade do ar
- Gelo

Modelagem

- BRAMS, WRF, FUNCEME, INPE
- Modelos de circulação atmosférica regional para trechos críticos da linha de transmissão

Queda de torre em Otacílio Costa/SC (2018)



TRANSMISSÃO

FATORES OCEÂNICOS

- Nível médio relativo do mar (elevação e rebaixamento)
- Aumento da temperatura da água do mar
- Variação da salinidade
- Onda (agitação marítima)
- Acidificação dos oceanos

FATORES HIDROMETEOROLÓGICOS

- Aumento gradual da temperatura do ar/Onda de calor
- Pressão atmosférica (alta e baixa)
- Umidade do ar (alta e baixa)
- Precipitação pluviométrica (bacia e local)
- Estiagem/seca prolongada
- Vento → Onda local

Modelagem

- BRAMS, WRF, FUNCEME, INPE



Estudo de caso -
TERMOPE

OBRIGADO !

gluigi@lima.coppe.ufrj.br

06 agosto 2020

