

# Emulación climática para predicciones decenales mediante “autoencoders” variacionales

## Climate emulation for decadal predictions using variational autoencoders

N. Tacoronte (1), M. García-Valdecasas Ojeda (1, 2), Y. Castro-Díez (1,2), M.J. Esteban-Parra (1,2), S. Gámiz-Fortis (1,2)

(1) Depto. Física Aplicada, Universidad de Granada. (2) Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía (IISTA-CEAMA), Granada

### RESUMEN

La emulación climática mediante modelos generativos profundos está emergiendo como una estrategia clave para acelerar la producción de simulaciones climáticas sintéticas y apoyar el análisis probabilístico de sucesos raros, en particular en el contexto de la predicción decenal. En este trabajo se presenta el desarrollo y la validación de un emulador climático basado en “Variational Autoencoders” (VAE), así como su extensión condicional (cVAE), orientados a la generación de campos espaciales de temperatura y precipitación. La motivación principal radica en que los VAE aprenden un espacio latente regularizado que tiende a una distribución Normal (0,1), propiedad especialmente útil en Climatología: los estados más frecuentes quedan concentrados cerca del centro, mientras que los eventos raros y extremos aparecen asociados a las colas, aportando un marco natural para explorar y sintetizar eventos de baja probabilidad. La metodología se ha estructurado en tres fases: (i) validación inicial en un problema controlado utilizando el conjunto de datos MNIST, una base de datos estándar de imágenes de dígitos manuscritos ampliamente empleada en aprendizaje automático como ejemplo simplificado (“toy example”), que permite una inspección visual directa de la calidad generativa del modelo; (ii) adaptación del modelo para el procesamiento de campos climáticos de alta dimensionalidad mediante arquitecturas convolucionales 2D (encoder/decoder), incorporando funciones de activación ReLU (para introducir no linealidad), “batch normalization” (para estabilizar y acelerar el entrenamiento) y “dropout” (como técnica de regularización para reducir el sobreajuste), con el fin de mejorar la estabilidad y la capacidad de generalización del modelo; (iii) implementación de un cVAE capaz de generar un campo objetivo condicionado a un conjunto de mapas de entrada, con el fin de aproximar relaciones multivariantes consistentes con la dinámica atmosférica. Los resultados muestran que el VAE no condicionado genera mapas climáticos espacialmente coherentes, reproduciendo patrones medios y características de variabilidad. En particular, el modelo mantiene un buen ajuste de estadísticos asociados a extremos, como percentiles altos y bajos, y métricas de la forma de la distribución (p.ej., curtosis), lo que sugiere que el espacio latente captura información relevante tanto del comportamiento central como de las colas de la distribución. Además, el cVAE confirma la viabilidad de introducir control mediante condiciones de entrada, abriendo la puerta al desarrollo de un emulador multivariable capaz de representar dependencias físicas entre predictores atmosféricos y eventos climáticos extremos. En general, este trabajo evidencia el potencial de los VAEs como herramienta práctica para emulación climática en predicción decenal.

*Agradecimientos:* Esta investigación ha sido llevada a cabo en el marco del proyecto PID2021-126401OB-I00, financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER, UE.