

2HDM-III (Tipo III) con Canales Hadrónicos y Decaimientos LFV

Enrique Barradas

BUAP – FCFM

September 30, 2025

Motivación

- El Modelo Estándar (SM) predice acoplamientos diagonales de Yukawa sin violación de sabor leptónica.
- Extensiones como el **2HDM-III** permiten acoplamientos de Higgs con estructura general en el espacio de sabores.
- Los acoplamientos de Yukawa LFV pueden parametrizarse con la **ansatz de Cheng–Sher**:

$$\rho_{ij} = \frac{\sqrt{m_i m_j}}{v} \chi_{ij},$$

donde χ_{ij} son parámetros adimensionales.

- Interés fenomenológico: decaimientos raros $h, H, A \rightarrow \ell_i \tau$ y contribuciones a $\tau \rightarrow \mu \gamma$, etc.

Estructura del 2HDM-III

- El Modelo de Dos Dobletes de Higgs Tipo III introduce dos campos escalares SU(2):

$$\Phi_1 = \begin{pmatrix} \phi_1^+ \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(v_1 + \rho_1 + i\eta_1) \end{pmatrix}, \quad \Phi_2 = \begin{pmatrix} \phi_2^+ \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(v_2 + \rho_2 + i\eta_2) \end{pmatrix}.$$

- Tras la ruptura electrodébil ($v^2 = v_1^2 + v_2^2$) surgen:
 - Dos escalares neutros CP-par: h, H .
 - Un escalar neutro CP-impar: A .
 - Dos escalares cargados: $H^\pm$.
- La mezcla está gobernada por $\tan\beta = v_2/v_1$ y el ángulo de mezcla α .

- Para evitar acoplamientos FCNC arbitrarios, se utiliza la parametrización:

$$\rho_{ij} = \frac{\sqrt{m_i m_j}}{v} \chi_{ij},$$

donde:

- m_i, m_j son las masas de los fermiones.
- χ_{ij} son parámetros adimensionales que controlan la magnitud de la nueva física.
- Con esta construcción, los acoplamientos LFV del Higgs quedan naturalmente suprimidos por la jerarquía de masas, pero aún pueden ser relevantes para $i\tau$.

Anchuras de Decaimiento

- El ancho parcial general:

$$\Gamma(\phi \rightarrow f_i f_j) = \frac{N_c m_\phi}{8\pi} \left(|y_{ij}^\phi|^2 + |y_{ji}^\phi|^2 \right) \Phi_{ij},$$

con:

- $N_c = 1$ leptones, 3 quarks.
- y_{ij}^ϕ acoplamientos efectivos de h, H, A .
- Φ_{ij} factor de fase-espacio.
- Se incluyen factores de corrección QCD (K -factors) en los canales hadrónicos.
- Los anchos totales:

$$\Gamma_{\text{tot}}(\phi) = \Gamma_{\text{lep}} + \Gamma_{\text{had}}.$$

Observables Fenomenológicos

- Razones de ramificación (BR):

$$\text{BR}(\phi \rightarrow X) = \frac{\Gamma(\phi \rightarrow X)}{\Gamma_{\text{tot}}(\phi)}.$$

- Escaneo en $|\chi_{i\tau}|$ revela regiones donde:
 - $\text{BR}(H/A \rightarrow \mu\tau)$ o $\text{BR}(H/A \rightarrow e\tau) \sim 10^{-4}$ – 10^{-2} .
 - Canales hadrónicos dominan Γ_{tot} .
- Resultados comparables con búsquedas de CMS y ATLAS para decaimientos LFV de Higgs.

Descripción del Script

- Implementa el **2HDM-III** en Python con:
 - 1 Espectro escalar: $h(125)$, H , A .
 - 2 Alineamiento caracterizado por $\cos(\beta - \alpha)$.
 - 3 Acoplamientos generales Yukawa ρ_{ij} para leptones y quarks.
 - 4 Anchuras parciales $\Gamma(\phi \rightarrow f_i f_j)$ para $\phi = h, H, A$.
 - 5 Inclusión de **canales hadrónicos** ($b\bar{b}$, $c\bar{c}$, $s\bar{s}$, $t\bar{t}$) con factores QCD efectivos.
- Se calculan:
 - Anchuras totales Γ_{tot} .
 - Razones de ramificación (BRs).
 - Gráficas de $\text{BR}(\phi \rightarrow i\tau)$ y fracciones hadrónicas vs $|\chi_{i\tau}|$.

Fórmulas Clave

- Acoplamientos en la base de Higgs:

$$y_{ij}^h = \frac{m_i}{v} s_{\beta-\alpha} \delta_{ij} + \frac{c_{\beta-\alpha}}{\sqrt{2}} \rho_{ij},$$

$$y_{ij}^H = \frac{m_i}{v} c_{\beta-\alpha} \delta_{ij} - \frac{s_{\beta-\alpha}}{\sqrt{2}} \rho_{ij},$$

$$y_{ij}^A = \frac{i}{\sqrt{2}} \rho_{ij}.$$

- Ancho parcial para $\phi \rightarrow f_i f_j$:

$$\Gamma(\phi \rightarrow f_i f_j) = \frac{N_c m_\phi}{8\pi} (|y_{ij}^\phi|^2 + |y_{ji}^\phi|^2) \Phi_{ij}(m_\phi),$$

donde $N_c = 1$ (leptones) o 3 (quarks), y Φ_{ij} es el factor de fase-espacio.

Resultados Numéricos

- Ejemplo para $H(400)$ GeV y $A(420)$ GeV:
 - $\text{BR}(H \rightarrow \mu\tau)$ en el rango 10^{-5} – 10^{-3} para $|\chi_{\mu\tau}| \sim 0.01$ – 0.1 .
 - $\text{BR}(H/A \rightarrow b\bar{b})$ suele dominar el ancho total.
 - $\Gamma_{\text{tot}}(H/A) \sim \mathcal{O}(1 - 10)$ GeV dependiendo de χ y $c_{\beta-\alpha}$.
- Gráficas del script:
 - 1 $\text{BR}(\phi \rightarrow i\tau)$ vs $|\chi_{i\tau}|$.
 - 2 Fracciones hadrónicas/leptónicas del total.
 - 3 Γ_{tot} vs $|\chi_{i\tau}|$.

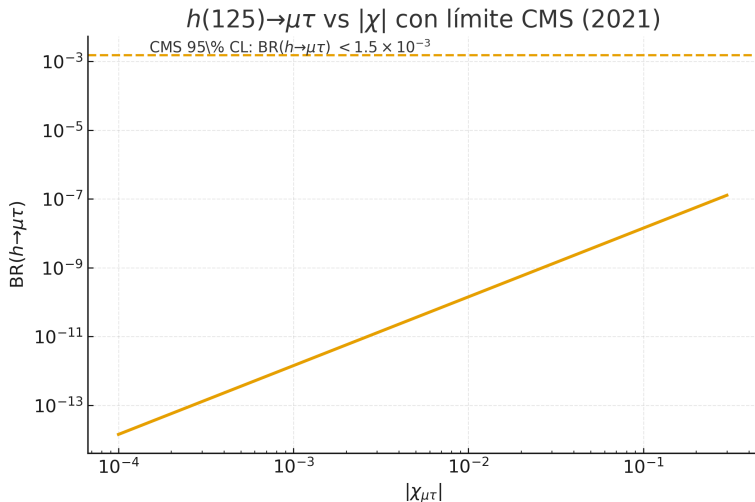
Límites experimentales relevantes

- **H(125) $\rightarrow \mu\tau, e\tau$ (CMS 2021): 95% CL**

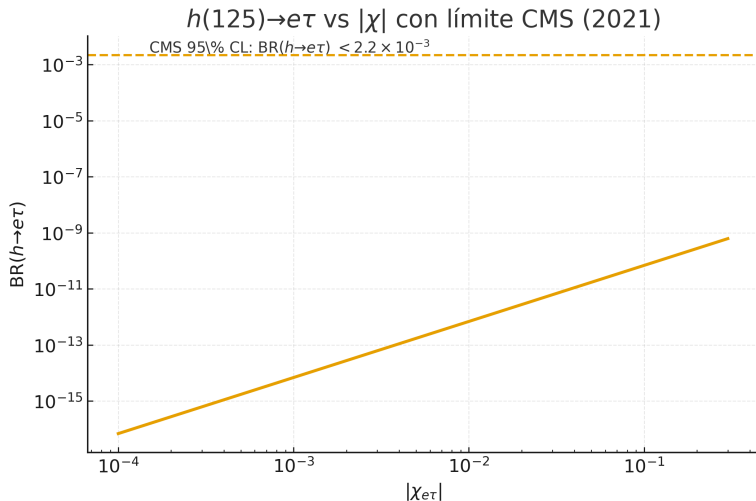
$$\mathcal{B}(h \rightarrow \mu\tau) < 1.5 \times 10^{-3}, \quad \mathcal{B}(h \rightarrow e\tau) < 2.2 \times 10^{-3}.$$

- **ATLAS (2019, 2023):** resultados consistentes en el mismo orden de magnitud.

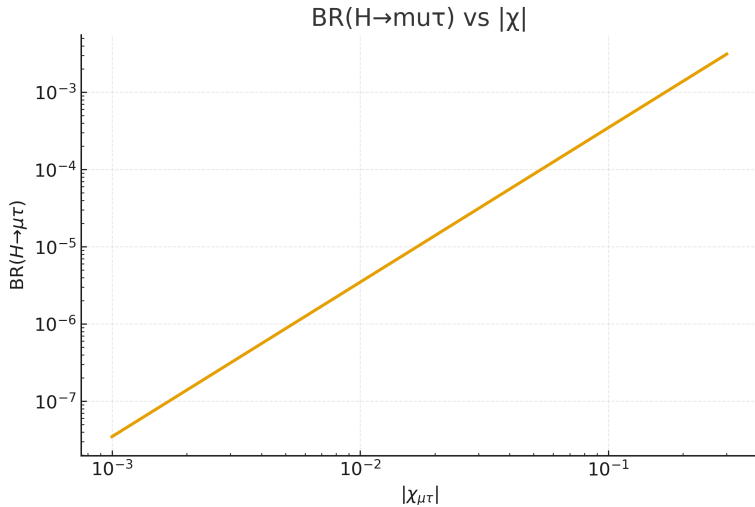
Comparación con límites: $h \rightarrow \mu\tau$



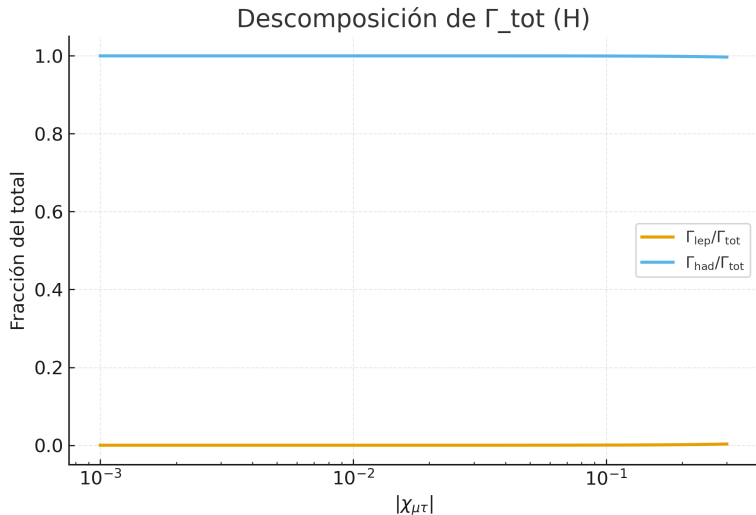
Comparación con límites: $h \rightarrow e\tau$



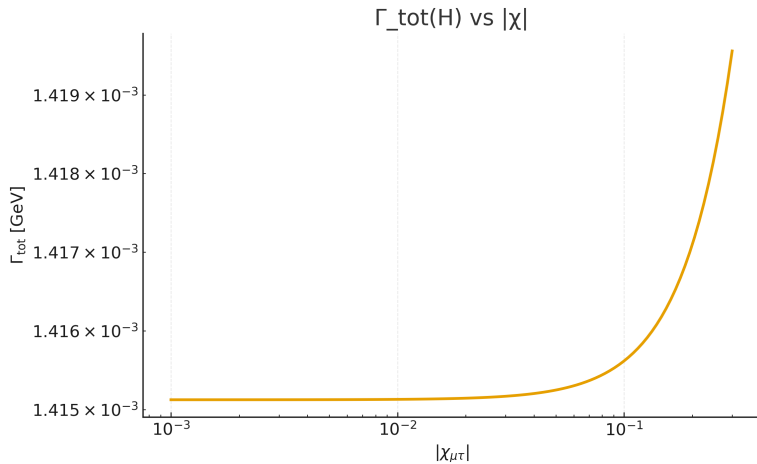
Escaneo: $\text{BR}(H \rightarrow \mu\tau)$ vs $|\chi_{\mu\tau}|$



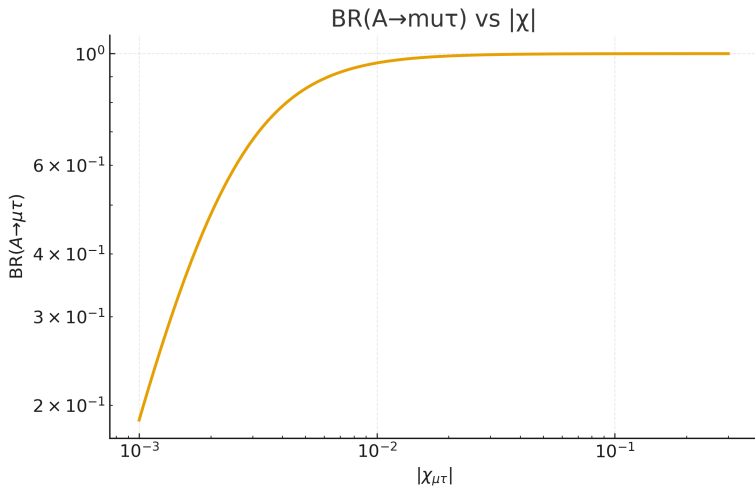
Descomposición de $\Gamma_{\text{tot}}(H)$



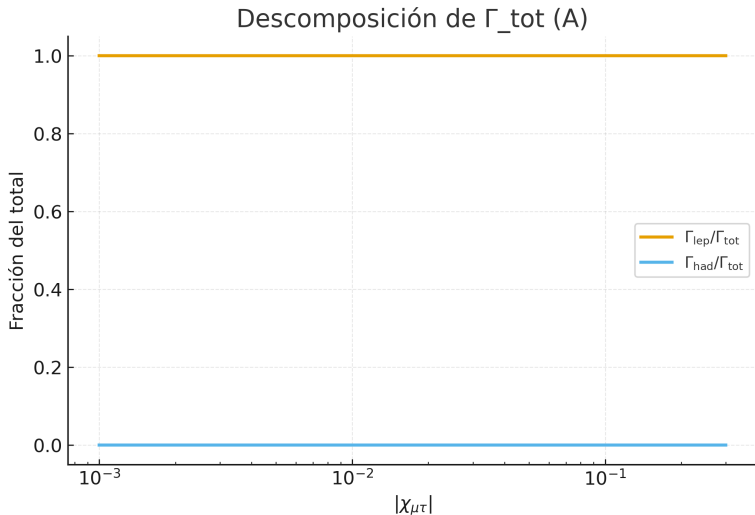
$\Gamma_{\text{tot}}(H)$ vs $|\chi_{\mu\tau}|$



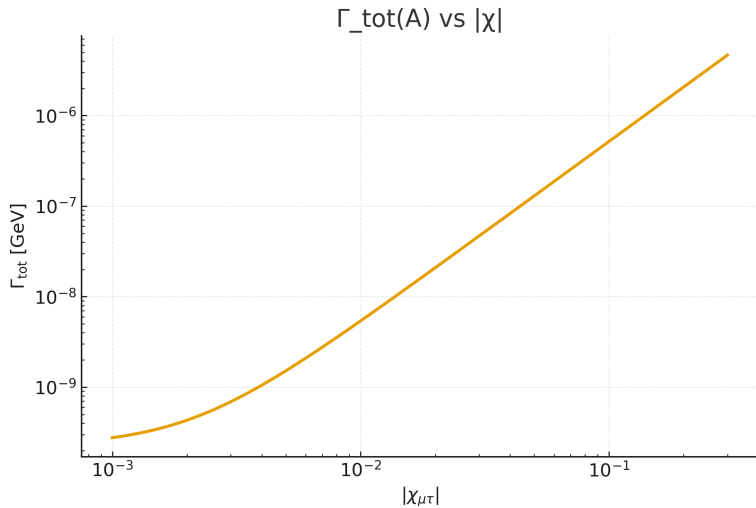
Escaneo: $\text{BR}(A \rightarrow \mu\tau)$ vs $|\chi_{\mu\tau}|$



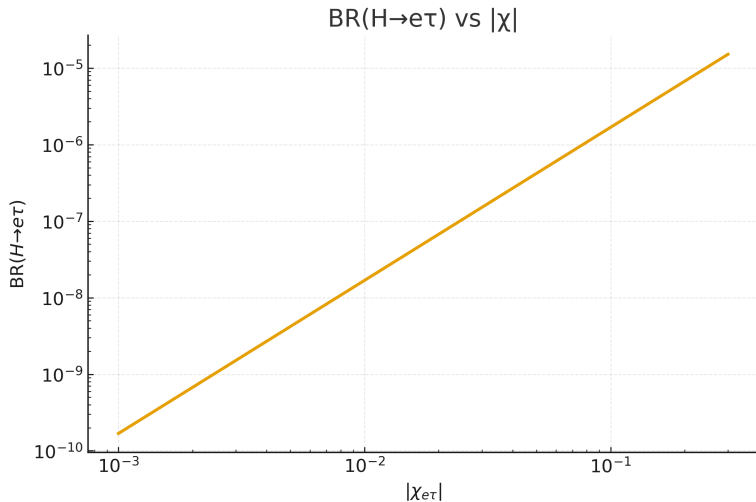
Descomposición de $\Gamma_{\text{tot}}(A)$



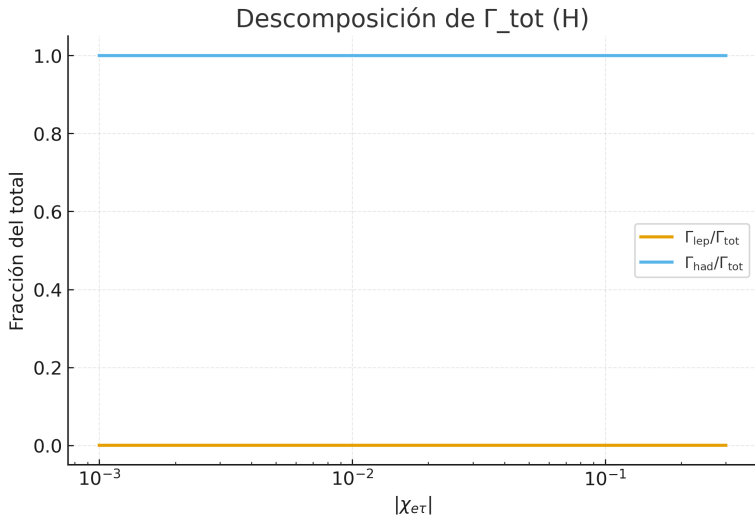
$\Gamma_{\text{tot}}(A)$ vs $|\chi_{\mu\tau}|$



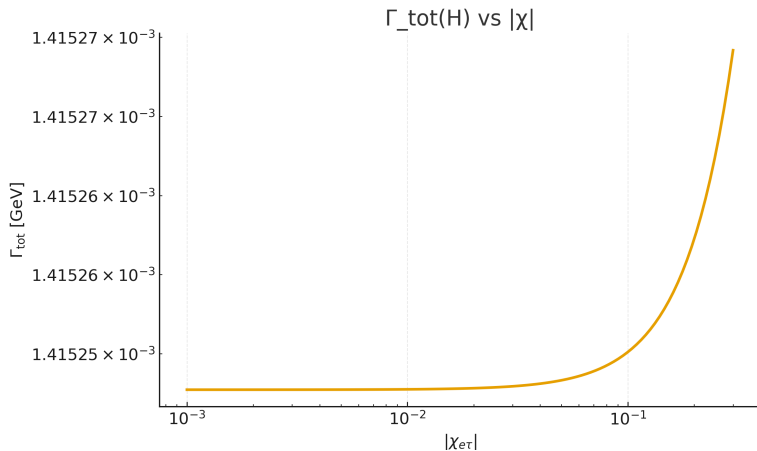
Escaneo: $\text{BR}(H \rightarrow e\tau)$ vs $|\chi_{e\tau}|$



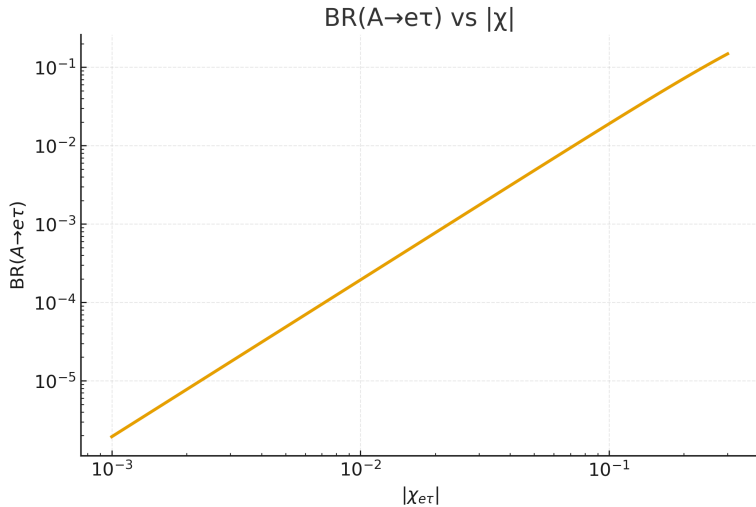
Descomposición de $\Gamma_{\text{tot}}(H)$ ($e\tau$)



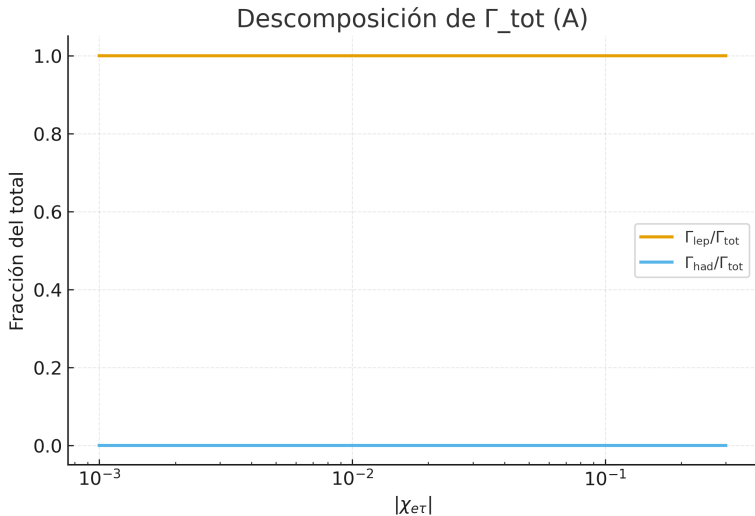
$\Gamma_{\text{tot}}(H)$ vs $|\chi_{e\tau}|$



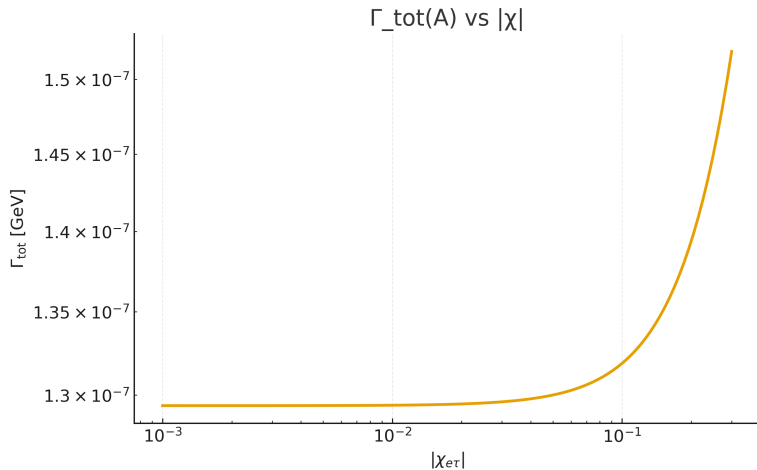
Escaneo: $\text{BR}(A \rightarrow e\tau)$ vs $|\chi_{e\tau}|$



Descomposición de $\Gamma_{\text{tot}}(A)$ ($e\tau$)



$\Gamma_{\text{tot}}(A)$ vs $|\chi_{e\tau}|$



Conclusiones

- El script implementa un **2HDM-III extendido** útil para estudios fenomenológicos.
- Permite explorar correlaciones entre acoplamientos LFV y canales hadrónicos.
- Es fácilmente extensible para incluir:
 - Canales bosónicos ($H/A \rightarrow WW, ZZ, hZ$).
 - Restricciones experimentales (CMS, ATLAS, Belle-II).

Bibliografía

-  T. P. Cheng and M. Sher, *Mass Matrix Ansatz and Flavor Nonconservation in Models with Multiple Higgs Doublets*, Phys. Rev. D **35**, 3484 (1987).
-  G. C. Branco, P. M. Ferreira, L. Lavoura *et al.*, *Theory and phenomenology of two-Higgs-doublet models*, Phys. Rept. **516**, 1 (2012).
-  J. F. Gunion, H. E. Haber, G. Kane, S. Dawson, *The Higgs Hunter's Guide*, Addison–Wesley (1990).
-  R. L. Workman *et al.* (PDG), *Review of Particle Physics*, PTEP **2022**, 083C01 (2022).

¡Gracias!