

# Bitácora

Pablo Jibrán Pomares Valdés

24 de marzo de 2025

# Filtro

Parámetros considerados.

Se busca que:

- Existe conservación de carga
- Se tengan 4 muones
- No haya jets con btag, rudeza media ( $\text{DeepbTag} < 0,5847$ ).  
ref
- Todos los muones sean globales.
- $\text{MET\_significance} < 0,1$

# Código

```
void filter(){
  TFile *f_old = TFile::Open("root://eospublic.cern.ch//eos/opendata/cms/Run2016H/DoubleMuon/NANO0AOD/UL2016H/DoubleMuon.root");
  TTree* t_old;
  f_old->GetObject("Events", t_old);

  const int nentries = t_old->GetEntries();

  // Deactivate all branches
  t_old->SetBranchStatus("", 0);

  // Activate desired branches
  for (auto actBranchName : {"run", "event", "Muon_charge", "Muon_dxy", "Muon_dxyErr", "Muon_isGlobal", "Muon_isTracker", "Muon_pt", "Muon_phi", "Muon_eta", "nMuon", "MET_phi", "MET_pt", "MET_significance", "nJet", "Jet_btagCSVV2", "Jet_btagDeepB"}){
    t_old->SetBranchStatus(actBranchName, 1);
  };

  // Entry selection
  UInt_t nMuon, nJet;
  Float_t Jet_btagDeepB[20];
  Bool_t Muon_isGlobal[10];
  Int_t Muon_charge[10];
  t_old->SetBranchAddress("nMuon", &nMuon);
  t_old->SetBranchAddress("nJet", &nJet);
  t_old->SetBranchAddress("Jet_btagDeepB", &Jet_btagDeepB);
  t_old->SetBranchAddress("Muon_isGlobal", &Muon_isGlobal);
  t_old->SetBranchAddress("Muon_charge", &Muon_charge);

  TFile newfile("prueba1.root", "recreate");
  auto t_new = t_old->CloneTree(0);
}
```

# Código

```
for (int i=0; i<nentries; i++){
    t_old->GetEntry(i);

    int sumCharge = 0;
    for (int j=0; j<nMuon; j++){
        sumCharge += Muon_charge[j];
    };
    bool chargeViolation = sumCharge;

    bool passbTag = true;
    for (int j=0; j<nJet; j++){
        if (Jet_btagDeepB[j] > 0.5847){
            passbTag = false;
        };
    };

    bool passnMuon = false;
    if (nMuon == 4){
        passnMuon = true;
    };

    bool passAllGlobal = true;
    for (int j=0; j<nMuon; j++){
        if (Muon_isGlobal[j] == 0){
            passAllGlobal = false;
        };
    };
    if (passAllGlobal && passbTag && passnMuon && !chargeViolation) {
        t_new->Fill();
    };

    t_new->Print();
    newfile.Write();
}
```

# filter\_all.sh

12/01/2025

Con un bash script y modificaciones menores a filter.C se puede automatizar y filtrar todos los archivos de root que se mencionan en el índice del Open data.

```
#!/bin/bash

# Checks for an index file
if [ $# -ne 1 ]; then
    echo "Error: No index file specified"
    echo "Usage: $0 <path/to/index_file.txt>"
    exit 1
fi

# Creates the output file name
IFS='/' read -ra INPUT <<"$1"
IFS=" " read -ra NAME <<${INPUT[-1]}
OUTPUT_NAME="${NAME[0]}_${NAME[1]}_${NAME[2]}_${NAME[6]}.root"

# Checks if directory exists. If not, creates it
DIR="rootfiles ${NAME[0]}_${NAME[1]}_${NAME[2]}_${NAME[6]}"
if [ ! -d $DIR ]; then
    echo "Creating output directory as $DIR"
    mkdir $DIR
    cd $DIR
else
    echo "Output directory already exists"
    cd $DIR
fi

i=0
while IFS= read -r line; do
    OUTPUT_NAME_PARTIAL="${NAME[0]}_${NAME[1]}_${NAME[2]}_${NAME[6]}.psi.root"
    macro command="./filter.C( \"${line}\", \"${OUTPUT_NAME_PARTIAL}\")"
    root -l -q "${macro_command}"
    ((i = i + 1))
done <"./${INPUT[-1]}"

hadd "../$OUTPUT_NAME" *.root
```



# Buscador de bosones Z

Parámetros considerados

Consideraré las variables:

- Muon\_pt
- Muon\_charge
- Muon\_eta
- Muon\_phi

# Masa invariante

Sabemos que la expresión para la masa invariante:

$$M^2 = 2p_{T1}p_{T2}(\cosh(\eta_1 - \eta_2) - \cos(\phi_1 - \phi_2))$$

```
Double_t inv_mass(Float_t pt1, Float_t pt2, Float_t phi1, Float_t phi2, Float_t eta1, Float_t eta2) {  
    Double_t eta_diff = eta1 - eta2;  
    Double_t phi_diff = phi1 - phi2;  
    Double_t pt_prod = 2*pt1*pt2;  
  
    Double_t m2 = pt_prod*(TMath::Cosh(eta_diff) - TMath::Cos(phi_diff));  
    Double_t m = TMath::Sqrt(m2);  
  
    return m;  
}
```

# z\_finder I

En general, se comparan todos los muones para buscar la generación de bosones Z. Por conservación de la carga, los muones que comparemos tiene que ser opuestos. Si esa condición se cumple, se busca que la masa invariante se encuentre en el rango  $|m - m_Z| \leq 10 \text{ GeV}$ .

En caso de que se encuentren dos candidatos que compartan un leptón, se selecciona el que tenga un mayor ángulo entre los muones.

Por último, se regresa un tuple que contenga el número de bosones Z en el determinado evento y una masa.



# z\_finder II

```
// Find the number of Z bosons on a event and its mass.
// If >1 it returns (for now) a single mass. However, this is unimportant because event is disca
class Z_finder{
public:
    UInt_t num_z;
    Double_t masses[2];
    std::array<Int_t, 2> z_muon_index;

    Z_finder(Float_t muon_pt[4], Float_t muon_phi[4], Float_t muon_eta[4], Int_t muon_charge[4])
    : num_z(0), masses{0.0, 0.0}, z_muon_index{0, 0}
    {
        for (int i=0; i<4; i++){
            int local_z = 0; // Number of Z candidates for that share a muon
            int z_local_index[3] {-1, -1, -1};
            Double_t local_masses[2] = {0., 0.};

            for (int j=i+1; j<4; j++){
                // Muon properties
                Float_t pt1 = muon_pt[i];
                Float_t pt2 = muon_pt[j];
                Float_t phi1 = muon_phi[i];
                Float_t phi2 = muon_phi[j];
                Float_t eta1 = muon_eta[i];
                Float_t eta2 = muon_eta[j];
                Int_t q1 = muon_charge[i];
                Int_t q2 = muon_charge[j];

                // Check for different charge
                bool same_charge = q1 + q2;
                z_local_index[0] = i;
                z_muon_index[0] = i;

                if (!same_charge) {
                    Double_t m = inv_mass(pt1, pt2, phi1, phi2, eta1, eta2);
                    if (m > 81.2 && m < 101.2){
                        local_masses[local_z] = m;
                        z_local_index[local_z+1] = j;
                        local_z++;
                    }
                }
            }
        }
    }
};
```

# z\_finder III

```
// If more there is more than one local Z choose the one with greater
// phi difference
if (local_z == 2){
    float phi1 = TMath::Abs(muon_phi[z_local_index[0]]);
    float phi2 = TMath::Abs(muon_phi[z_local_index[1]]);
    float phi3 = TMath::Abs(muon_phi[z_local_index[2]]);

    float diff1_2 = phi1 - phi2;
    float diff1_3 = phi1 - phi3;

    if (diff1_2 > diff1_3){
        masses[num_z] = local_masses[0];
        z_muon_index[1] = z_local_index[1];
    }
    else {
        masses[num_z] = local_masses[1];
        z_muon_index[1] = z_local_index[2];
    };
};

if (local_z) {num_z++;};
}
};
```

# z\_finder results

```
Se tienen 2121 eventos con 1 Z.  
Se tienen 28 eventos con 2 Z.  
Se tienen 96221 eventos con ningún Z.
```

# Algoritmo usado

Por el momento estoy utilizando el algoritmo que se encuentra en [6] para calcular el  $m_{T2}$ , ya que es el más rápido y preciso que he encontrado. Aunque me gustaría tratar de implementar el mío (aunque sea peor) en algún momento.

Lo que tuve que hacer fue descomponer el momento transversal en sus componentes  $x$  y  $y$  tanto como de los muones como de la energía perdida. De ahí el archivo "lester\_mt2\_bisct.h" se encarga de lo demás.

# WWZ\_finder

06/01/2025

Previamente presenté resultados pero puede ser que se encuentren equivocados. La energía de todos los leading muons es demasiado grande, alrededor de  $110 \text{ GeV}/c^2$  lo cual lo veo improbable. Tengo que checar mis unidades en el código. Además, otra cosa que encuentro sospechosa es que de 110 eventos con un Z, 108 tengan dos W. En [8] se nos indica que la mayoría del background proviene de producción de ZZ, por lo que encuentro improbable que haya tenido mucha suerte. Seguramente también sea problemas de unidades.

# WWZ\_finder

En el archivo WWZ\_finder.C está mis pocos avances para mi algoritmo de búsqueda mientras que en test.C está actualmente implementado el algoritmo de [6].

Cosas que planeo hacer:

- Corregir el error en el que ningun dato cumple las condiciones.
- Usar datos que me mandó Jeremy para guiarme en lo que tengo que observar. Por mi cuenta haré algo similar pero con muones en lugar de electrones, para que se asemeje lo más posible a mi caso.
- Automatizar

# WWZ\_finder

13/01/2025

El error con las unidades fue corregido y ahora los resultados son más realistas. Además, logré arreglar el error de las inconsistencias al momento de buscar la producción de bosones Z. La solución fue cambiar a un objeto `Z_finder()` en lugar de usarlo como función, esto tuvo la ventaja adicional de que el código es más legible.

También convertí en objeto la función `vec_comp()` (ahora `Vec_comp()`).

Aún no hago la distribución de  $m_T$  para el muón.

# WWZ\_finder

20/01/2025

Cambios menores a filter.C: quité MET\_significance y agrugué que existiera una MET\_pt mayor a 20. Como ya tengo MET, no hay posibilidad de que tenga ZZ, por lo que también removí esa opción en wwz\_finder.C. Si existen dos candidatos a Z en el mismo evento, tomo aquél cuyos muones estén más opuestos (asumo que no hay boost y que el vértice primario no está fuera del centro). En ningún artículo sobre WW mencionan al mT2. Lo que me llamó la atención bastante es el rango bastante grande en el que pueden existir los WW.



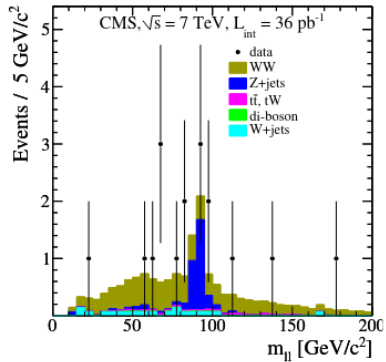


Figura 1: Gráfico de [2]

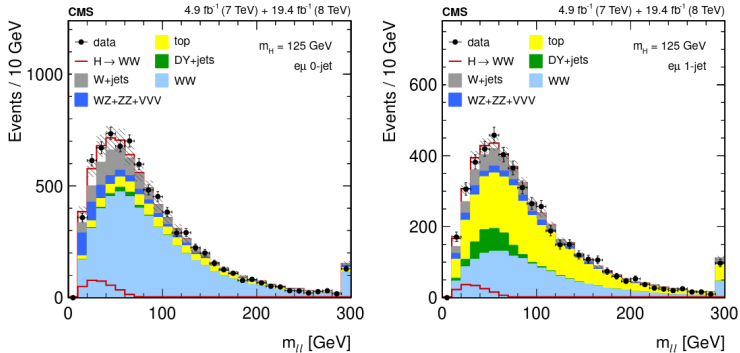


Figura 2: Gráfico de [4]

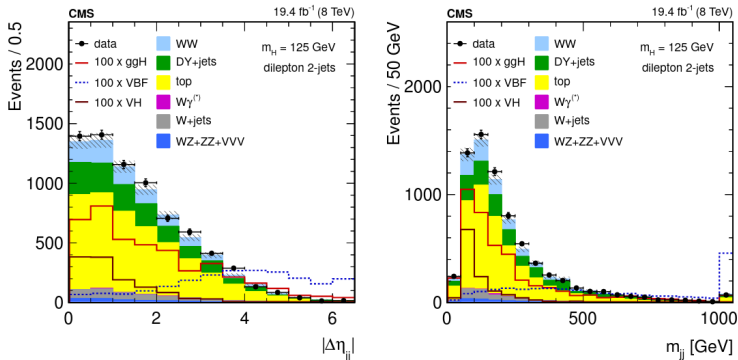


Figura 3: Gráfico de [4]

24/02/2025

En el reciente artículo [1] se busca la producción de WW utilizando  $m_{T2}$ . Me basé en sus consideraciones para encontrar en mi situación los WW que me faltaban. En el artículo se buscan eventos  $WW \rightarrow e^{\pm} \mu^{\mp} \nu \nu$  pero no debería de ser muy distinto a mi caso. Únicamente aumenté la  $m_{ll}$  entre los leptones. Las consideraciones son:

- La masa invariante del dileptón  $m_{\mu\mu} > 120$  GeV (o  $m_{\mu\mu} > 100$  GeV que es lo que menciona el artículo).
- La magnitud de la energía transversa faltante  $E_T^{\text{miss}} \in [60, 80]$  GeV.
- $m_{T2} \in [60, 80]$  GeV.

con estas consideraciones encontré 1 (o 3) evento(s).

Después de conseguir estos eventos, usé *Brilcalc* para el cálculo de la luminosidad, el cual obtiene dichas mediciones a partir de los servidores de CERN Open Data. Me regresó la siguiente luminosidad:

run:fill	delivered(/fb)	recorded (/fb)
280363:5287	0.052596501	0.049786727
283358:5421	0.184486057	0.174497334
284038:5451	0.010577462	0.009103140

dando una luminosidad total medida de  $L_{int} = 0,2333872$ . La run del evento que pasó el filtro de  $m_{\mu\mu} > 120$  GeV es el primero.

Sabiendo que podemos calcular la sección eficaz de la siguiente manera [5]:

$$\sigma = \frac{N}{\mathcal{L}}$$

Nos da una sección eficaz de 20,08 fb (o de 12,85 fb) lo cual es mucho menor a los 300 fb medidos en [8]. No obstante, esto no es una muy buena referencia por las diferencias en los métodos de búsqueda. Por lo que no puedo decir con certeza si es compatible con el SM.

03/03/2025

Para mejorar la búsqueda de WWZ, es necesario buscar las características que tienen los dos bosones W. Basándome en los resultados más recientes de producción de WW en el CMS [3]. En este paper, para la búsqueda por cortes secuenciales con SF, se usan los siguientes parámetros

Cantidad	Sequential Cut (SF)
$p_T^{\max}$	$> 25$
$p_T^{\min}$	$> 20$
$m_{ll}$	$> 40$
$ m_{ll} - m_Z $	$> 15$
$p_T^{\text{miss}}$	$> 55$
$p_T^{\text{miss, proj}}$	$> 20$
$\Delta R$	$> 0,4$

El background más grande sería la producción del proceso de Drell-Yan pero en el paper usan un discriminador el cual no tengo. Además, por lo que leí, se puede filtrar haciendo uso de missing energy y descartando eventos en el rango del bosón Z.

En cuestión de resultados, ha sido muy poco lo que he podido encontrar. Mi analizador ha encontrado hasta el momento alrededor de 150 eventos. Comparando a los 3800 eventos encontrados en el paper con únicamente alrededor del doble de luminosidad,  $35,8 \text{ fb}^{-1}$ , algo anda mal. Aún así, tal vez encontrar resultados tan precisos con WW no sea de vital importancia, ya que quiero más saber qué características tiene respecto al  $m_{T2}$  por ejemplo.



10/03/2025

Después de remover mis requisitos de  $\Delta R$ , ya obtuve muchos mejores resultados para mi búsqueda de WW. No obstante, el problema de la cross section continúa. En mi caso, obtengo una cross section de 4549 fb pero en el paper tienen una de 106 pb, la diferencia es abismal. Honestamente, no sé qué podría causar esta discrepancia.

El método que uso para obtener la cross section es la que aparece en [5], pero en uno de los papers de ATLAS que vi usan la siguiente fórmula:

$$\sigma_{WW} = \frac{N_{\text{obs}} - N_{\text{bkg}}}{\mathcal{C} \cdot \mathcal{L}}$$

Donde  $\mathcal{C}$  es un factor de corrección relacionado con las ineficiencias del detector. Existirá algo similar para el CMS? Esto lo digo también porque intentando obtener las cross section marcadas en mis papers de referencia usando el método usual tampoco me regresan lo mismo.

De ahí en fuera realicé cambios menores a mi código.

24/03/2025

Implementé el filtro del número de jets ( $\leq 1$ ) en mi filtro y encontré 3625 eventos, lo que me da una sección eficaz de 2670,23 fb. Es una mejora de la última vez, no obstante sigue siendo alrededor del doble de eventos que esperaría con mi luminosidad. Unas ideas que se me ocurrieron para corregir esto es usar datos simulados de CMS Open Data, por ejemplo este, aunque honestamente no estoy muy seguro si su estructura me vaya a hacer útil.

Otra cuestión es sobre la utilidad de tener un discriminador de Drell-Yan en mi análisis de WWZ, es posible este proceso en  $q\bar{q} \rightarrow V_1 V_2 V_2$ ? En el artículo [7] menciona sobre la producción de  $W^\pm$ , Z, y Higgs en interacciones  $qq$  o  $gg$ , así que igual y no me tengo que preocupar por este efecto en mi análisis.

Si este es el caso, tendría 48 eventos, o 2,94 fb.  
Si estamos seguros de este paso de "ignorar" DYMVA, podría calcular  $\mathcal{C}$  y ver si coincide con el valor reportado en [8].

- [1] ATLAS Collaboration. «Measurements of  $W^+W^-$  production in decay topologies inspired by searches for electroweak supersymmetry». en. En: *The European Physical Journal C* 83.8 (ago. de 2023). Company: Springer Distributor: Springer Institution: Springer Label: Springer Number: 8 Publisher: Springer Berlin Heidelberg, págs. 1-29. ISSN: 1434-6052. DOI: 10.1140/epjc/s10052-023-11508-9. URL: <https://springerlink.bibliotecabuap.elogim.com/article/10.1140/epjc/s10052-023-11508-9> (visitado 08-02-2025).
- [2] C. M. S. Collaboration. «Measurement of WW Production and Search for the Higgs Boson in pp Collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV». En: *Physics Letters B* 699.1-2 (mayo de 2011). arXiv:1102.5429 [hep-ex], págs. 25-47. ISSN: 03702693. DOI:

10.1016/j.physletb.2011.03.056. URL:  
<http://arxiv.org/abs/1102.5429> (visitado 20-01-2025).

- [3] CMS Collaboration. «WW boson pair production in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV». En: *Physical Review D* 102.9 (nov. de 2020). ISSN: 2470-0029. DOI: 10.1103/physrevd.102.092001. URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.102.092001>.
- [4] The CMS collaboration. «Measurement of Higgs boson production and properties in the WW decay channel with leptonic final states». en. En: *Journal of High Energy Physics* 2014.1 (ene. de 2014), pág. 96. ISSN: 1029-8479. DOI: 10.1007/JHEP01(2014)096. URL: [https://doi.org/10.1007/JHEP01\(2014\)096](https://doi.org/10.1007/JHEP01(2014)096) (visitado 20-01-2025).

- [5] Werner Herr y B Muratori. «Concept of luminosity». En: (2006). DOI: 10.5170/CERN-2006-002.361. URL: <https://cds.cern.ch/record/941318>.
- [6] Christopher G. Lester y Benjamin Nachman. «Bisection-based asymmetric M\_T2 computation: a higher precision calculator than existing symmetric methods». En: *Journal of High Energy Physics* 2015.3 (mar. de 2015). ISSN: 1029-8479. DOI: 10.1007/jhep03(2015)100. URL: [http://dx.doi.org/10.1007/JHEP03\(2015\)100](http://dx.doi.org/10.1007/JHEP03(2015)100).
- [7] Jen-Chieh Peng y Jian-Wei Qiu. «The Drell-Yan Process». En: *The Universe* 4.3 (2016), págs. 34-44.
- [8] A.M. et al. Sirunyan. «Observation of the Production of Three Massive Gauge Bosons at  $\sqrt{s}=13\text{TeV}$ ». En: *Physical Review Letters* 125.15 (oct. de 2020). ISSN:

1079-7114. DOI: 10.1103/physrevlett.125.151802. URL:  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.151802>.