



**Universidad de Chile**

Departamento de Ciencias de la Computación

**Procesamiento de Lenguaje  
Natural**

Apuntes de Clases

Felipe Bravo-Márquez

7 de julio de 2023

# Índice general

<b>Preface</b>	<b>1</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>3</b>
1.1. PLN y Lingüística Computacional . . . . .	3
1.2. Niveles de descripción lingüística . . . . .	5
1.2.1. Fonética . . . . .	5
1.2.2. Fonología . . . . .	5
1.2.3. Morfología . . . . .	5
1.2.4. Sintaxis . . . . .	6
1.2.5. Semántica . . . . .	6
1.2.6. Pragmática . . . . .	7
1.3. Procesamiento del Lenguaje Natural y Aprendizaje Automático	8
1.4. Desafíos del Lenguaje . . . . .	9
1.5. Ejemplo de tareas NLP . . . . .	9
1.5.1. Lingüística y Procesamiento del Lenguaje Natural (PNL)	11
1.6. Desafíos en el Procesamiento del Lenguaje Natural (PNL) . . .	12
1.7. Estudio de caso: Clasificación de sentimientos en tweets . . . .	13
1.8. Ingeniería de características y Aprendizaje Profundo . . . . .	14
1.9. Historia . . . . .	15
1.10. Conclusiones . . . . .	16
<b>2. Modelo de Espacio Vectorial y Recuperación de Información</b>	<b>17</b>
2.1. Tokens y Tipos . . . . .	17
2.1.1. Ley de Zipf . . . . .	19
2.1.2. Listas de publicaciones y el índice invertido . . . . .	20
2.1.3. Motores de búsqueda web . . . . .	20
2.2. El modelo de espacio vectorial . . . . .	21
2.2.1. Similitud entre vectores . . . . .	23
2.3. Agrupamiento de Documentos . . . . .	24
2.3.1. K-Means . . . . .	25
2.4. Conclusiones y Conceptos Adicionales . . . . .	25

<b>3. Modelos de Lenguaje Probabilísticos</b>	<b>27</b>
3.1. El Problema del Modelado del Lenguaje . . . . .	27
3.1.1. ¿Por qué queríamos hacer esto? . . . . .	28
3.1.2. Los Modelos de Lenguaje son Generativos . . . . .	29
3.2. ¿Por qué los modelos de lenguaje son importantes? . . . . .	29
3.2.1. Un Método Ingenuo . . . . .	30
3.3. Procesos de Markov . . . . .	31
3.3.1. Modelado de secuencias de longitud variable . . . . .	31
3.4. Modelos de lenguaje trigram . . . . .	32
3.4.1. El problema de estimación trigram . . . . .	32
3.5. Evaluación de un modelo de lenguaje: Perplejidad . . . . .	33
3.5.1. El trade-off entre sesgo y varianza . . . . .	34
3.5.2. Estimación de máxima verosimilitud y overfitting . . . . .	34
3.5.3. Técnicas de regularización . . . . .	35
3.6. Interpolación Lineal . . . . .	35
3.7. Estimación de los Valores $\lambda$ . . . . .	36
3.8. Métodos de Descuento . . . . .	36
3.8.1. Modelos de Katz Back-Off (Bigramas) . . . . .	37
3.9. Resumen . . . . .	39
<b>4. Text Classification and Naïve Bayes</b>	<b>41</b>
4.1. Clasificación de texto: Definición . . . . .	43
4.1.1. Métodos de clasificación: Reglas codificadas a mano . . . . .	44
4.1.2. Métodos de clasificación: Aprendizaje automático supervisado . . . . .	44
4.1.3. Problemas de aprendizaje supervisado . . . . .	44
4.1.4. Modelos generativos . . . . .	45
4.1.5. Clasificación con Modelos Generativos . . . . .	45
4.2. Intuición del Bayes Ingenuo . . . . .	45
4.2.1. Aplicación de la Regla de Bayes a Documentos y Clases . . . . .	45
4.3. Clasificador Bayes Ingenuo . . . . .	46
4.3.1. Suposiciones de Independencia del Bayes Ingenuo Multinomial . . . . .	47
4.3.2. Clasificador Bayes Ingenuo Multinomial . . . . .	47
4.3.3. Aplicación de los clasificadores Naive Bayes multinomiales a la clasificación de texto . . . . .	48
4.3.4. Problemas al multiplicar muchas probabilidades . . . . .	48
4.3.5. Aprendizaje del modelo Naive Bayes multinomial . . . . .	48
4.3.6. Estimación de parámetros . . . . .	49
4.3.7. Probabilidades cero y el problema de las palabras no vistas . . . . .	49
4.3.8. Suavizado Laplaciano (Add-1) para Naïve Bayes . . . . .	50
4.3.9. Naïve Bayes multinomial: aprendizaje . . . . .	51
4.3.10. Palabras desconocidas . . . . .	51
4.4. Ejemplo . . . . .	51
4.5. Naïve Bayes como modelo de lenguaje . . . . .	52
4.6. Evaluación . . . . .	53

4.6.1.	La Matriz de Confusión 2x2 . . . . .	53
4.6.2.	Evaluación: Exactitud . . . . .	54
4.6.3.	Evaluación: Precisión y Recall . . . . .	54
4.6.4.	¿Por qué Precisión y Recall? . . . . .	54
4.6.5.	Una Medida Combinada: Medida F . . . . .	55
4.6.6.	Conjuntos de Prueba de Desarrollo ("Devsets") . . . . .	55
4.6.7.	Validación Cruzada: Múltiples Divisiones . . . . .	56
4.6.8.	Matriz de Confusión para clasificación de 3 clases . . . . .	57
<b>5.</b>	<b>Modelos Lineales</b>	<b>59</b>
5.1.	Aprendizaje Supervisado . . . . .	59
5.1.1.	Funciones Parametrizadas . . . . .	59
5.2.	Modelos Lineales . . . . .	59
5.2.1.	Ejemplo: Detección de Idiomas . . . . .	60
5.3.	Clasificación binaria log-lineal . . . . .	62
5.4.	Clasificación multiclas . . . . .	62
5.5.	Representaciones . . . . .	63
5.6.	Representación de Vectores One-Hot . . . . .	64
5.7.	Entrenamiento . . . . .	65
5.7.1.	Optimización basada en Gradiente . . . . .	66
5.7.2.	Descenso de Gradiente Estocástico en Línea . . . . .	67
5.7.3.	Descenso de Gradiente Estocástico en Mini-batch . . . . .	68
5.7.4.	Funciones de Pérdida . . . . .	68
5.8.	Regularización . . . . .	70
5.8.1.	Regularización $L_2$ . . . . .	70
5.8.2.	Regularización $L_1$ . . . . .	71
5.8.3.	Elastic-Net . . . . .	71
5.9.	Más allá del SGD . . . . .	71
5.10.	Conjuntos de entrenamiento, prueba y validación . . . . .	72
5.11.	Una limitación de los modelos lineales: el problema XOR . . . . .	72
5.11.1.	Transformaciones no lineales de las entradas . . . . .	74
<b>6.</b>	<b>Redes Neuronales</b>	<b>75</b>
6.1.	Redes neuronales feedforward . . . . .	75
6.1.1.	Redes neuronales como funciones matemáticas . . . . .	77
6.2.	Capacidad de representación . . . . .	78
6.3.	Funciones de activación . . . . .	78
6.3.1.	Problemas Prácticos . . . . .	81
6.4.	Capas de Embedding . . . . .	81
6.4.1.	Vectores Densos vs Representaciones One-hot . . . . .	82
6.5.	Entrenamiento de Redes Neuronales . . . . .	84
6.6.	Recordatorio de la Regla de la Cadena en Derivadas . . . . .	84
6.7.	Retropropagación . . . . .	86
6.8.	La Abstracción del Grafo de Cómputo . . . . .	89
6.8.1.	Cómputo hacia Adelante . . . . .	90
6.8.2.	Cómputo hacia Atrás (Retropropagación) . . . . .	91

6.8.3. Resumen de la Abstracción del Grafo de Cómputo . . . . .	91
6.8.4. Derivadas de funciones no matemáticas . . . . .	92
6.9. Regularización y Dropout . . . . .	92
6.10. Frameworks de Aprendizaje Profundo . . . . .	93
<b>7. Vectores de Palabra</b>	<b>95</b>
7.1. Hipótesis Distribucional y Matrices Palabra Contexto . . . . .	95
7.2. PPMI . . . . .	96
7.3. Word2Vec . . . . .	97
7.3.1. Parametrización del modelo Skip-gram . . . . .	99
7.3.2. Skip-gram con Negative Sampling . . . . .	100
7.3.3. Continuous Bag of Words: CBOW . . . . .	101
7.3.4. GloVe . . . . .	102
7.4. Analogías de palabras . . . . .	102
7.5. Evaluación . . . . .	102
7.6. Correspondencia entre modelos distribuidos y distribucionales	103
7.7. FastText . . . . .	103
7.8. Embeddings de frases específicas de sentimiento . . . . .	104
7.9. Gensim . . . . .	105
<b>8. Etiquetado de Secuencias</b>	<b>107</b>
8.1. Tareas de Etiquetado de Secuencias o Etiquetado . . . . .	107
8.2. Etiquetado de Partes del Discurso . . . . .	107
8.3. Reconocimiento de Entidades Nombradas (NER) . . . . .	108
8.3.1. Etiquetado de secuencias como aprendizaje supervisado	109
8.3.2. Enfoque generativo para el etiquetado de secuencias .	110
8.4. Modelos Ocultos de Markov . . . . .	110
8.5. Modelos Ocultos de Markov Trigramas (Trigram HMM) . . .	110
8.5.1. Parámetros del modelo . . . . .	111
8.6. Supuestos de independencia en los HMM trigramas . . . .	111
8.7. ¿Por qué el nombre? . . . . .	112
8.8. Estimación Suavizada . . . . .	113
8.9. Tratando con Palabras de Baja Frecuencia . . . . .	113
8.10. Problema de Decodificación . . . . .	114
8.10.1. Método Bruto Ingenuo . . . . .	114
8.11. Decodificación de Viterbi con Programación Dinámica	115
8.12. El Algoritmo de Viterbi . . . . .	117
8.12.1. Una Definición Recursiva . . . . .	118
8.12.2. El Algoritmo de Viterbi . . . . .	119
8.12.3. El Algoritmo de Viterbi con Punteros de Retroceso	119
8.12.4. El Algoritmo de Viterbi: Tiempo de Ejecución . .	120
8.13. MEMMs . . . . .	120
8.14. Ejemplo de características utilizadas en el etiquetado de partes del habla . . . . .	122
8.15. Plantillas de características . . . . .	123
8.16. MEMMs y Softmax Multiclasificación . . . . .	123

8.17. Entrenamiento de los MEMMs . . . . .	124
8.18. Decodificación con MEMMs . . . . .	125
8.19. Comparación entre MEMMs y HMMs . . . . .	126
8.20. Campos Aleatorios Condicionales (CRFs) . . . . .	127
8.21. Decodificación con CRFs . . . . .	129
8.22. Estimación de Parámetros en CRFs (Entrenamiento) . . . . .	130
8.23. CRFs y MEMMs . . . . .	131
8.23.1. CRFs y MEMMs: el problema del sesgo de etiqueta . . . . .	131
8.24. Enlaces . . . . .	132
<b>9. Redes Neuronales Convolucionales</b>	<b>135</b>
9.1. Redes Neuronales Convolucionales (CNN) en Procesamiento del Lenguaje Natural (PLN) . . . . .	135
9.2. Convolución Básica + Agrupamiento . . . . .	135
9.3. Convoluciones 1D sobre Texto . . . . .	136
9.4. Convoluciones Angostas vs. Amplias . . . . .	137
9.5. Agrupamiento Vectorial . . . . .	137
9.6. Clasificación de Sentimientos en Twitter con CNN . . . . .	138
9.7. Redes Neuronales Convolucionales Muy Profundas para la Clasificación de Texto . . . . .	139
<b>10. Redes Neuronales Recurrentes</b>	<b>141</b>
10.1. La Abstracción de las RNN . . . . .	141
10.2. Red Elman o Simple-RNN . . . . .	143
10.3. Entrenamiento de las RNN . . . . .	144
10.4. Patrones de uso de las RNN: Aceptador . . . . .	145
10.5. Patrones de uso de las RNN: Transductor . . . . .	145
10.6. Redes neuronales recurrentes bidireccionales (BIRNN) . . . . .	146
10.7. Redes neuronales recurrentes multi-capa (apiladas) . . . . .	147
10.8. Arquitecturas con compuertas . . . . .	148
10.9. LSTM . . . . .	150
10.10. GRU . . . . .	151
10.11. Clasificación de sentimientos con RNN . . . . .	152
10.12. Clasificación de sentimientos en Twitter con LSTMS y Emojis . . . . .	153
10.13. Bi-LSTM CRF . . . . .	153
<b>11. Modelos Secuencia a Secuencia y Atención Neuronal</b>	<b>157</b>
11.1. Modelos de lenguaje y generación de lenguaje . . . . .	157
11.2. Problemas de secuencia a secuencia . . . . .	158
11.2.1. Generación condicionada . . . . .	158
11.3. Enfoques de decodificación . . . . .	160
11.3.1. Búsqueda Beam . . . . .	161

<b>12. Arquitectura de Transformer</b>	<b>163</b>
12.1. What's Wrong with RNNs? . . . . .	163
12.1.1. Dependencies in neural machine translations . . . . .	163
12.2. The Transformer . . . . .	164
12.3. Attention Mechanism in the Transformer . . . . .	166
12.3.1. Queries . . . . .	167
12.3.2. Keys . . . . .	167
12.3.3. Values . . . . .	168
12.3.4. Scaled Dot Product Attention . . . . .	168
12.4. The Encoder . . . . .	169
12.5. Self-Attention at a High Level . . . . .	171
12.6. Self-Attention in Detail . . . . .	171
12.7. Matrix Calculation of Self-Attention . . . . .	174
12.8. Multi-Head Attention . . . . .	175
12.9. Residual Connections . . . . .	178
12.10. The Encoder: summary . . . . .	178
12.11. The Decoder . . . . .	179
12.12. The Final Linear and Training . . . . .	181
12.13. Positional Encodings . . . . .	183
12.14. Conclusions . . . . .	184
<b>13. Grandes Modelos de Lenguaje</b>	<b>185</b>
13.1. Representations for a word . . . . .	185
13.2. Neural Language Models can produce Contextualized Embeddings . . . . .	185
13.3. ELMo: Embeddings from Language Models . . . . .	186
13.3.1. ELMo: Use with a task . . . . .	186
13.4. ULMfit . . . . .	187
13.4.1. ULMfit emphases . . . . .	187
13.4.2. ULMfit transfer learning . . . . .	188
13.5. Let's scale it up! . . . . .	188
13.6. BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) . . . . .	188
13.7. Masked Language Modeling and Next Sentence Prediction . . . . .	190
13.8. BERT sentence pair encoding . . . . .	190
13.9. BERT Model Architecture and Training . . . . .	190
13.10. BERT model fine tuning . . . . .	191
13.10.1. BERT results on GLUE tasks . . . . .	192
13.10.2. BERT Effect of pre-training task . . . . .	193
13.11. Pre-training decoders GPT and GPT-2 . . . . .	193
13.12. What kinds of things does pretraining learn? . . . . .	195
13.13. Phase Change: GPT-3 (2020) . . . . .	196
13.14. Zero-shot, One-shot, and Few-shot Learning with GPT-3 . . . . .	196
13.15. Chain-of-thought Prompting . . . . .	196
13.16. Language Models as User Assistants (or Chatbots) . . . . .	197
13.16.1. LaMDA: Language Models for Dialog Applications . . . . .	197
13.17. ChatGPT and RLHF . . . . .	200

13.18GPT-4 (2023) . . . . .	201
13.19Instruction Fine-tuning . . . . .	201
13.20Dangers of Large Language Models . . . . .	201
13.21Large Language Models Time-line . . . . .	202
13.22Prompt Engineering . . . . .	202
13.23Conclusions . . . . .	203



# Índice de cuadros

2.1. Matriz tf-idf . . . . .	24
------------------------------	----

X

# Índice de figuras

1.1.	Reconocimiento de Entidades Nombradas . . . . .	3
2.1.	Ley de Zipf . . . . .	20
2.2.	Índice invertido . . . . .	20
2.3.	Los diversos componentes de un motor de búsqueda web [Manning et al., 2008].	21
2.4.	Similitud del coseno. . . . .	23
2.5.	Conjunto de documentos donde los grupos se pueden identificar claramente. . . . .	25
2.6.	Algoritmo K-means . . . . .	26
4.1.	James Madison . . . . .	42
4.2.	Alexander Hamilton . . . . .	42
7.1.	Ejemplo tomado de: <a href="http://cs224d.stanford.edu/lectures/CS224d-Lecture2.pdf">http://cs224d.stanford.edu/lectures/CS224d-Lecture2.pdf</a> . . . . .	96
7.2.	Imagen tomada del artículo original . . . . .	98
7.3.	Imagen tomada de: <a href="http://mccormickml.com/2016/04/19/word2vec-tutorial-the-skip-gram-model/">http://mccormickml.com/2016/04/19/word2vec-tutorial-the-skip-gram-model/</a> . . . . .	98
7.4.	Imagen tomada de: <a href="http://mccormickml.com/2016/04/19/word2vec-tutorial-the-skip-gram-model/">http://mccormickml.com/2016/04/19/word2vec-tutorial-the-skip-gram-model/</a> . . . . .	101
7.5.	Fuente: <a href="https://www.tensorflow.org/tutorials/word2vec102">https://www.tensorflow.org/tutorials/word2vec102</a>	
8.1.	Ejemplo de características en el etiquetado de partes del habla .	124
8.2.	Ejemplo de características en el etiquetado de partes del habla (continuación) . . . . .	125
8.3.	CRF Example . . . . .	129
9.1.	Arquitectura básica de una CNN para procesamiento del lenguaje natural. . . . .	136
9.2.	Arquitectura CNN para la clasificación de sentimientos en Twitter.	138
9.3.	Arquitectura VDCNN para la clasificación de texto. . . . .	139
10.1.	Representación gráfica de una RNN. . . . .	142

10.2. Representación gráfica de una RNN desenrollada para una secuencia de longitud finita. . . . .	143
10.3. Representación gráfica de la RNN después de expandir la recursión. . . . .	143
10.4. Red Elman o Simple-RNN. . . . .	144
10.5. Gráfico de entrenamiento de una RNN del tipo aceptador. . . . .	145
10.6. Gráfico de entrenamiento de una RNN del tipo transductor. . . . .	146
10.7. Red neuronal recurrente bidireccional (birRNN). . . . .	147
10.8. Redes neuronales recurrentes multi-capa (apiladas). . . . .	148
10.9. Formulación matemática de la arquitectura LSTM. . . . .	150
10.10. Cadena desenrollada de una arquitectura LSTM. . . . .	151
10.11. Arquitectura GRU. . . . .	152
10.12. Arquitectura de red neuronal para la clasificación de sentimientos en Twitter con LSTMS y emojis (parte 1). . . . .	154
10.13. Arquitectura de red neuronal para la clasificación de sentimientos en Twitter con LSTMS y emojis (parte 2). . . . .	155
10.14. Demostración del modelo: <a href="https://deeplearned.mit.edu/">https://deeplearned.mit.edu/</a> . . . . .	156
11.1. Arquitectura de generación de lenguaje con una RNN. . . . .	158
11.2. Búsqueda greedy en la decodificación de secuencia a secuencia. . . . .	162

# Prefacio

Este apunte es el resultado de cinco años de experiencia en la enseñanza del curso de Procesamiento de Lenguaje Natural en la Universidad de Chile<sup>1</sup>. El objetivo es proporcionar una introducción a esta disciplina, centrándose en las técnicas y conceptos fundamentales. Se ha realizado un esfuerzo por lograr un equilibrio entre las técnicas tradicionales, como los modelos de lenguaje de N-gramas, Naive Bayes y los modelos ocultos de Markov (HMM), y los enfoques modernos basados en redes neuronales profundas, como los vectores de palabras, las redes neuronales recurrentes (RNN), los transformers y los grandes modelos de lenguaje. Sin embargo, es importante mencionar que existen temas relevantes que no se incluyen en este material, como el etiquetado de datos, las gramáticas, las técnicas de parsing, así como discusiones sobre tareas más específicas como el question answering.

El contenido se ha recopilado de diversas fuentes. Los temas relacionados con las redes neuronales se basan principalmente en el libro "Neural Network Methods for Natural Language Processing" de Goldberg [Goldberg, 2017]. Los temas no relacionados con las redes neuronales, como los modelos probabilísticos del lenguaje, Naive Bayes y HMM, se han tomado del curso de Michael Collins de Columbia [Collins, 2013] y del borrador de la tercera edición del libro de Dan Jurafsky y James H. Martin [Jurafsky and Martin, 2023]. Además, algunos capítulos se han adaptado de tutoriales en línea y otros cursos, como el curso de Stanford de Christopher Manning<sup>2</sup>. Las imágenes utilizadas se han extraído intencionalmente directamente de sus fuentes correspondientes. Algún día se diseñarán imágenes propias.

---

<sup>1</sup>El repositorio del curso se encuentra en: <https://github.com/dccuchile/CC6205>

<sup>2</sup><http://web.stanford.edu/class/cs224n/>



# Capítulo 1

## Introducción

El volumen de datos textuales digitalizados que se genera cada día es enorme (por ejemplo, la web, redes sociales, registros médicos, libros digitalizados). Por lo tanto, también crece la necesidad de traducir, analizar y gestionar esta avalancha de palabras y texto.

El procesamiento del lenguaje natural (PLN) es el campo que se encarga de diseñar métodos y algoritmos que toman como entrada o producen como salida datos de **lenguaje natural** no estructurado [Goldberg, 2017]. El PLN se centra en el diseño y análisis de algoritmos computacionales y representaciones para procesar el lenguaje humano [Eisenstein, 2018].

Una tarea común de PLN es el Reconocimiento de Entidades Nombradas (NER, por sus siglas en inglés). Por ejemplo:

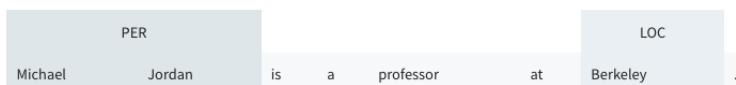


Figura 1.1: Reconocimiento de Entidades Nombradas

El lenguaje humano es altamente ambiguo, como en las frases: "Comí pizza con amigos", "Comí pizza con aceitunas.", "Comí pizza con un tenedor". Además, el lenguaje está en constante cambio y evolución, como ocurre con los hashtags en Twitter.

### 1.1. PLN y Lingüística Computacional

PLN suele confundirse con otra disciplina hermana llamada Lingüística Computacional (LC). Si bien ambas están estrechamente relacionadas, tienen un foco distinto. La LC busca responder preguntas fundamentales sobre el lenguaje mediante el uso de la computación, es decir, cómo entendemos el lenguaje.

je, cómo producimos lenguaje o cómo aprendemos lenguaje. Mientras que en PLN el foco está en resolver problemas específicos, tales como la transcripción automática del habla, la traducción automática, la extracción de información de documentos y el análisis de opiniones en redes sociales. Es importante señalar que en PLN, el éxito de una solución se mide en base métricas concretas (Ej: qué tan similar es la traducción automática a una hecha por un humano) independientemente si el modelo hace uso de alguna teoría lingüística.

El procesamiento del lenguaje natural (PLN) desarrolla métodos para resolver problemas prácticos relacionados con el lenguaje [Johnson, 2014].

Algunos ejemplos son:

- Reconocimiento automático del habla.
- Traducción automática.
- Extracción de información de documentos.

La lingüística computacional (LC) estudia los procesos computacionales subyacentes al lenguaje (humano).

- ¿Cómo comprendemos el lenguaje?
- ¿Cómo producimos el lenguaje?
- ¿Cómo aprendemos el lenguaje?

El PLN y la LC utilizan métodos y modelos similares.

Aunque existe una superposición sustancial, hay una diferencia importante en el enfoque. La LC se centra en la lingüística respaldada por métodos computacionales (similar a la biología computacional o la astronomía computacional). En lingüística, el lenguaje es el objeto de estudio. El PLN se centra en resolver tareas bien definidas relacionadas con el lenguaje humano (como la traducción, la respuesta a consultas, las conversaciones). Si bien los conocimientos lingüísticos fundamentales pueden ser cruciales para realizar estas tareas, el éxito se mide en función de si y cómo se logra el objetivo (según una métrica de evaluación) [Eisenstein, 2018].

El procesamiento del lenguaje natural y la lingüística computacional están estrechamente relacionados y se superponen en muchos aspectos. Ambos campos utilizan métodos y modelos similares para abordar problemas relacionados con el lenguaje humano. Sin embargo, la diferencia principal radica en el enfoque: la lingüística computacional se centra en la lingüística respaldada por métodos computacionales, mientras que el procesamiento del lenguaje natural se centra en resolver tareas prácticas relacionadas con el lenguaje. Ambos campos son fundamentales para comprender y aprovechar el poder del lenguaje humano en la era digital.

## 1.2. Niveles de descripción lingüística

El campo de la **descripción lingüística** abarca diferentes niveles:

- **Fonética y fonología:** estudio de los sonidos del habla.
- **Morfología:** estudio de la estructura de las palabras.
- **Sintaxis:** estudio de la estructura de las oraciones.
- **Semántica:** estudio del significado de las palabras y oraciones.
- **Pragmática:** estudio del uso del lenguaje en el contexto.

El PLN puede abordar tareas en cada uno de estos niveles, pero a menudo se enfoca en niveles más altos de representación y comprensión.

### 1.2.1. Fonética

La fonética es la rama de la lingüística que se ocupa del estudio de los sonidos del lenguaje. Examina los órganos utilizados en la producción de sonidos, como la boca, la lengua, la garganta, la nariz, los labios y el paladar. Los sonidos del lenguaje se dividen en vocales y consonantes. Las vocales se producen con poca restricción del flujo de aire desde los pulmones, mientras que las consonantes implican alguna restricción o cierre en el tracto vocal [Johnson, 2014, Fromkin et al., 2018]. Además, el Alfabeto Fonético Internacional (AFI) proporciona una notación alfabética para representar los sonidos fonéticos.

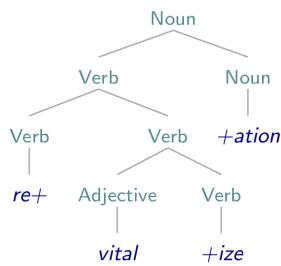
### 1.2.2. Fonología

La fonología se centra en el estudio de cómo los sonidos del habla forman patrones y construyen significado. Los fonemas son las unidades básicas de sonido que diferencian el significado de las palabras. Por ejemplo, en inglés, la "p" y la "b" son fonemas distintos porque cambian el significado de las palabras en las que se encuentran. La fonología también examina las variaciones en la pronunciación de los sonidos en diferentes contextos y dialectos [Fromkin et al., 2018].

### 1.2.3. Morfología

La morfología se ocupa del estudio de la estructura interna de las palabras. Los morfemas son las unidades mínimas de significado que componen las palabras. Por ejemplo, en la palabra "deshacer", los morfemas son "des-", "hacer" y "er". La morfología también se interesa por los procesos de formación de palabras, como la derivación, donde se agregan prefijos o sufijos a una palabra existente para formar una nueva palabra con un significado diferente [Johnson, 2014].

- La morfología estudia la estructura de las palabras (por ejemplo, re+estructur+ando, in+olvid+able) [Johnson, 2014]
- Morfema: el término lingüístico para la unidad más elemental de forma gramatical [Fromkin et al., 2018]. Por ejemplo, morfología = morf + ología (la ciencia de).
- Morfología derivativa: proceso de formar una nueva palabra a partir de una palabra existente, a menudo mediante la adición de un prefijo o sufijo.
- La morfología derivativa exhibe una estructura jerárquica. Ejemplo: re+vital+iz+ación



- El sufijo generalmente determina la categoría sintáctica (part-of-speech) de la palabra derivada.

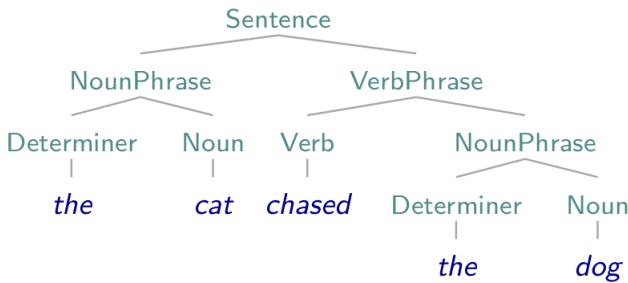
#### 1.2.4. Sintaxis

La sintaxis es el estudio de cómo las palabras se combinan para formar frases y oraciones gramaticales. Examina las reglas y estructuras que determinan la organización de las palabras en una oración y cómo influyen en el significado. La sintaxis también se ocupa de la relación entre las palabras y las funciones que desempeñan dentro de una oración. Por ejemplo, en la oración "El perro persigue al gato", "el perro" es el sujeto, "persigue" es el verbo y "al gato" es el complemento directo [Johnson, 2014].

- La sintaxis estudia las formas en que las palabras se combinan para formar frases y oraciones [Johnson, 2014]
- El análisis sintáctico ayuda a identificar **quién hizo qué a quién**, un paso clave para comprender una oración.

#### 1.2.5. Semántica

La semántica es el estudio del significado de las palabras, frases y oraciones, examinando cómo se construye e interpreta este significado en el contexto del lenguaje. Además, la semántica se interesa por los roles semánticos, que



indican la función de cada entidad en una oración. Por ejemplo, en la oración "El niño cortó la cuerda con una navaja", "el niño" es el agente, "la cuerda" es el tema y "una navaja" es el instrumento [Johnson, 2014].

La semántica se enfoca en el significado de las palabras, frases y oraciones. Estudia cómo se construye e interpreta este significado en el contexto del lenguaje. Además, dentro de la semántica, se analizan los roles semánticos, los cuales indican la función que desempeña cada entidad en una oración. Por ejemplo, en la oración "El niño cortó la cuerda con una navaja", se identifican distintos roles semánticos: "el niño" como el agente, "la cuerda" como el tema y "una navaja" como el instrumento utilizado [Johnson, 2014].

En resumen:

- La semántica estudia el significado de las palabras, frases y oraciones [Johnson, 2014].
- Dentro de la semántica, se analizan los roles semánticos, que indican el papel desempeñado por cada entidad en una oración.
- Algunos ejemplos de roles semánticos son: **agente** (la entidad que realiza la acción), **tema** (la entidad involucrada en la acción) y **instrumento** (otra entidad utilizada por el agente para llevar a cabo la acción).
- En la oración "El niño cortó la cuerda con una navaja", se puede identificar el agente como **el niño**, el tema como **la cuerda** y el instrumento como **una navaja**.
- Además de los roles semánticos, la semántica también abarca las relaciones léxicas, que son las relaciones entre diferentes palabras [Yule, 2016].
- Algunos ejemplos de relaciones léxicas incluyen la sinonimia (conceal/hide), la antonimia (shallow/deep) y la hipónimia (perro/animal).

### 1.2.6. Pragmática

La pragmática se centra en cómo el contexto influye en la interpretación y el significado de las expresiones lingüísticas. Examina cómo se utilizan las expre-

siones lingüísticas en situaciones reales y cómo los hablantes interpretan el significado implícito. Por ejemplo, la oración "Hace frío aquí" puede interpretarse como una sugerencia implícita de cerrar las ventanas [Fromkin et al., 2018].

### 1.3. Procesamiento del Lenguaje Natural y Aprendizaje Automático

Comprender y producir el lenguaje computacionalmente es extremadamente complejo. La tecnología más exitosa actualmente para abordar PLN es el aprendizaje automático supervisado que consiste en una familia de algoritmos que “aprenden” a construir la respuesta del problema en cuestión en base a encontrar patrones en datos de entrenamiento etiquetados. Por ejemplo, si queremos tener un modelo que nos diga si un tweet tiene un sentimiento positivo o negativo respecto a un producto, primero necesito etiquetar manualmente un conjunto de tweets con su sentimiento asociado. Luego debo entrenar un algoritmo de aprendizaje sobre estos datos para poder predecir de manera automática el sentimiento asociado a tweets desconocidos. Como se podrán imaginar, el etiquetado de datos es una parte fundamental de la solución y puede ser un proceso muy costoso, especialmente cuando se requiere conocimiento especializado para definir la etiqueta.

Aunque los seres humanos somos grandes usuarios del lenguaje, también somos muy malos para comprender y describir formalmente las reglas que rigen el lenguaje.

Entender y producir lenguaje utilizando computadoras es altamente desafiante. Los métodos más conocidos para lidar con datos de lenguaje se basan en el aprendizaje automático supervisado.

El aprendizaje automático supervisado consiste en intentar inferir patrones y regularidades a partir de un conjunto de pares de entrada y salida preanotados (también conocido como conjunto de datos de entrenamiento).

**Conjunto de Datos de Entrenamiento: Datos de NER CoNLL-2003** Cada línea contiene un token, una etiqueta de parte de la oración, una etiqueta de sintagma y una etiqueta de entidad nombrada.

U.N.	NNP	I-NP	I-ORG
official	NN	I-NP	O
Ekeus	NNP	I-NP	I-PER
heads	VBZ	I-VP	O
for	IN	I-PP	O
Baghdad	NNP	I-NP	I-LOC
.	.	O	O

<sup>1</sup>Fuente: <https://www.clips.uantwerpen.be/conll2003/ner/>

## 1.4. Desafíos del Lenguaje

Existen tres propiedades desafiantes del lenguaje: la discreción, la composicionalidad y la dispersión.

**Discreción:** no podemos inferir la relación entre dos palabras a partir de las letras que las componen (por ejemplo, hamburguesa y pizza).

**Composicionalidad:** el significado de una oración va más allá del significado individual de sus palabras.

**Dispersión:** la forma en que las palabras (símbolos discretos) pueden combinarse para formar significados es prácticamente infinita.

## 1.5. Ejemplo de tareas NLP

**Clasificación de temas** La clasificación de temas es una tarea de Procesamiento del Lenguaje Natural (PLN) en la cual se asigna a un documento una de varias categorías, como deportes, política, cotilleos o economía. Las palabras presentes en los documentos brindan pistas importantes sobre su tema. Sin embargo, redactar reglas para esta tarea es un desafío debido a la complejidad del lenguaje. La anotación de datos, en la cual los lectores clasifican los documentos por temas, puede ayudar a generar conjuntos de datos de entrenamiento para algoritmos de aprendizaje automático supervisado. Estos algoritmos aprenden patrones de uso de palabras que facilitan la categorización de los documentos.

- Clasificar un documento en una de las cuatro categorías: Deportes, Política, Cotilleos y Economía.
- Las palabras en los documentos proporcionan indicios muy sólidos.
- ¿Qué palabras brindan qué indicios?
- Elaborar reglas para esta tarea resulta bastante desafiante.
- No obstante, los lectores pueden categorizar fácilmente varios documentos según su tema (anotación de datos).
- Un algoritmo de aprendizaje automático supervisado puede identificar los patrones de uso de palabras que ayudan a categorizar los documentos.

**Análisis de Sentimiento** El análisis de sentimientos se refiere a la aplicación de técnicas de Procesamiento del Lenguaje Natural (PLN) para identificar y extraer información subjetiva de conjuntos de datos textuales. Un desafío común en el análisis de sentimientos es la clasificación de la polaridad a nivel de mensaje (MPC), donde las frases se clasifican automáticamente en categorías

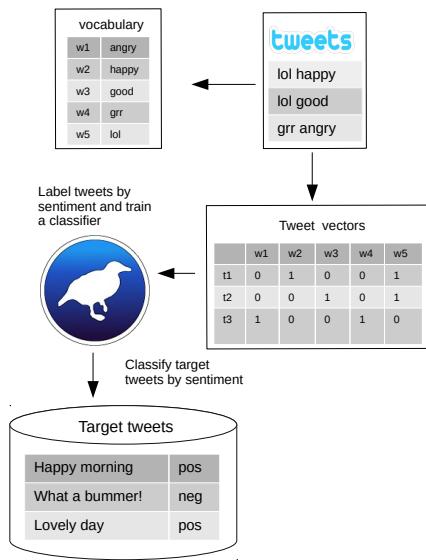
positivas, negativas o neutrales. Las soluciones más avanzadas utilizan modelos de aprendizaje automático supervisado entrenados con ejemplos anotados manualmente.

En este tipo de clasificación, es habitual emplear el aprendizaje supervisado, siendo las Máquinas de Vectores de Soporte (SVM) una opción popular. El objetivo de las SVM es encontrar un hiperplano que separe las clases con el margen máximo, logrando la mejor separación entre las clases positivas, negativas y neutrales [Eisenstein, 2018].

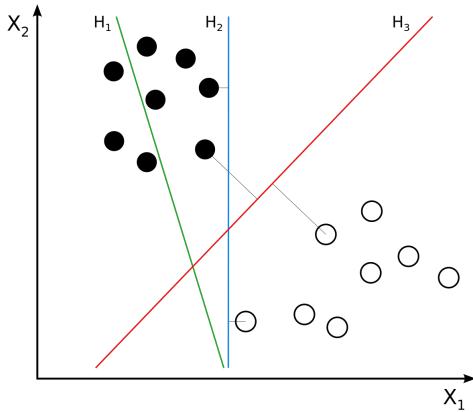
- Aplicación de técnicas de **PLN** para identificar y extraer información subjetiva de conjuntos de datos textuales.
- Clasificación automática de frases en las categorías **positiva**, **negativa** o **neutral**.



- Las soluciones más avanzadas emplean modelos de aprendizaje automático **supervisado**, entrenados con ejemplos **anotados manualmente** [Mohammad et al., 2013].



- Idea: Encontrar un hiperplano que separe las clases con el margen máximo (mayor separación).



- $H_3$  separa las clases con el margen máximo.

### 1.5.1. Lingüística y Procesamiento del Lenguaje Natural (PNL)

El conocimiento de las estructuras lingüísticas es fundamental para el diseño de características y el análisis de errores en el Procesamiento del Lenguaje Natural (PNL). Los enfoques de aprendizaje automático en PNL se basan en características que describen y generalizan las instancias de uso del lenguaje. El conocimiento lingüístico orienta la selección y el diseño de estas características, ayudando al algoritmo de aprendizaje automático a encontrar correlaciones entre el uso del lenguaje y las etiquetas objetivo [Bender, 2013].

- El conocimiento de las estructuras lingüísticas es importante para el diseño de características y el análisis de errores en PNL [Bender, 2013].
- Los enfoques de aprendizaje automático en PNL requieren características que puedan describir y generalizar el uso del lenguaje.
- El objetivo es guiar al algoritmo de aprendizaje automático para encontrar correlaciones entre el uso del lenguaje y el conjunto de etiquetas objetivo.
- El conocimiento sobre las estructuras lingüísticas puede influir en el diseño de características para los enfoques de aprendizaje automático en PNL.

El PNL plantea diversos desafíos, como los costos de anotación, las variaciones de dominio y la necesidad de actualizaciones continuas. La anotación manual requiere mucho trabajo y tiempo. Las variaciones de dominio implican aprender patrones diferentes para diferentes corpus de texto. Los modelos entrenados en un dominio pueden no funcionar bien en otro. Además, los modelos de PNL pueden volverse obsoletos a medida que el uso del lenguaje evoluciona con el tiempo.

## 1.6. Desafíos en el Procesamiento del Lenguaje Natural (PNL)

- **Costos de Anotación:** la anotación manual es **laboriosa** y **consume mucho tiempo**.
- **Variaciones de Dominio:** el patrón que queremos aprender puede variar de un corpus a otro (por ejemplo, deportes, política).
- ¡Un modelo entrenado con datos anotados de un dominio no necesariamente funcionará en otro!
- Los modelos entrenados pueden quedar desactualizados con el tiempo (por ejemplo, nuevos hashtags).

### Variación de Dominio en el Análisis de Sentimiento

1. Para mí, la cola era bastante **pequeña** y solo tuve que esperar unos 20 minutos, ¡pero valió la pena! :D @raynwise
2. Extraña espacialidad en Stuttgart. La habitación del hotel es tan **pequeña** que apenas puedo moverme, pero los alrededores son inhumanamente vastos y largos bajo construcción.

### Superando los costos de anotación de datos Supervisión Distant:

- Etiquetar automáticamente datos no etiquetados (**API de Twitter**) utilizando un método heurístico.
- **Enfoque de Anotación de Emoticonos (EAA):** los tweets con emoticonos positivos :) o negativos :( se etiquetan según la polaridad indicada por el emotícono [Read, 2005].
- El emotícono se **elimina** del contenido.
- Este enfoque también se ha ampliado utilizando hashtags como #anger y emojis.
- No es trivial encontrar técnicas de supervisión distante para todo tipo de problemas de PNL.

### Crowdsourcing

- Confiar en servicios como **Amazon Mechanical Turk** o **Crowdflower** para solicitar a la **multitud** que anote datos.
- Esto puede resultar costoso.
- Es difícil garantizar la calidad de las anotaciones.

## **1.7. Estudio de caso: Clasificación de sentimientos en tweets**

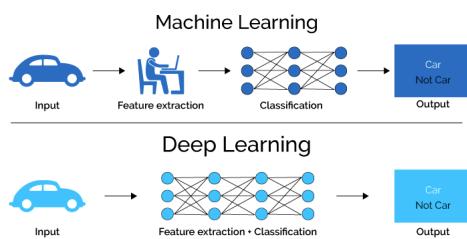
- En 2013, el taller de Evaluación Semántica (SemEval) organizó la tarea de "Análisis de sentimientos en Twitter" [Nakov et al., 2013].
- La tarea se dividió en dos sub-tareas: el nivel de expresión y el nivel del mensaje.
- Nivel de expresión: se centró en determinar la polaridad del sentimiento de un mensaje según una entidad marcada dentro de su contenido.
- Nivel del mensaje: se debía determinar la polaridad según el mensaje en general.
- Los organizadores lanzaron conjuntos de datos de entrenamiento y prueba para ambas tareas [Nakov et al., 2013].

### **El sistema NRC**

- El equipo que logró el mejor rendimiento en ambas tareas, entre 44 equipos, fue el equipo *NRC-Canada* [Mohammad et al., 2013].
- El equipo propuso un enfoque supervisado utilizando un clasificador SVM lineal con las siguientes características hechas a mano para representar los tweets:
  1. N-gramas de palabras.
  2. N-gramas de caracteres.
  3. Etiquetas de partes del discurso.
  4. Agrupaciones de palabras entrenadas con el método de agrupamiento de Brown [Brown et al., 1992].
  5. El número de palabras alargadas (palabras con un carácter repetido más de dos veces).
  6. El número de palabras con todas las letras en mayúscula.
  7. La presencia de emoticonos positivos o negativos.
  8. El número de negaciones individuales.
  9. El número de secuencias contiguas de puntos, signos de interrogación y signos de exclamación.
  10. Características derivadas de lexicones de polaridad [Mohammad et al., 2013]. Dos de estos lexicones se generaron utilizando el método PMI a partir de tweets anotados con hashtags y emoticonos.

## 1.8. Ingeniería de características y Aprendizaje Profundo

- Hasta 2014, la mayoría de los sistemas de PNL de última generación se basaban en ingeniería de características + modelos de aprendizaje automático superficiales (por ejemplo, SVM, HMM).
- Diseñar las características de un sistema de PNL ganador requiere mucho conocimiento específico del dominio.
- El sistema NRC se construyó antes de que el aprendizaje profundo se hiciera popular en PNL.
- Por otro lado, los sistemas de Aprendizaje Profundo se basan en redes neuronales para aprender automáticamente buenas representaciones.



### Ingeniería de características y Aprendizaje Profundo

- El Aprendizaje Profundo proporciona resultados de última generación en la mayoría de las tareas de PNL.
- Grandes cantidades de datos de entrenamiento y máquinas GPU multicore más rápidas son clave en el éxito del aprendizaje profundo.
- Las **redes neuronales** y las **incrustaciones de palabras** desempeñan un papel fundamental en los modelos modernos de PNL.

### Aprendizaje Profundo y Conceptos Lingüísticos

- Si los modelos de aprendizaje profundo pueden aprender representaciones automáticamente, ¿siguen siendo útiles los conceptos lingüísticos (por ejemplo, sintaxis, morfología)?
- Algunos defensores del aprendizaje profundo argumentan que estas propiedades lingüísticas inferidas y diseñadas manualmente no son necesarias, y que la red neuronal aprenderá estas representaciones intermedias (o equivalentes o mejores) por sí misma [Goldberg, 2016].
- Aún no hay un consenso definitivo al respecto.

- Goldberg cree que muchos de estos conceptos lingüísticos pueden ser inferidos por la red por sí misma si se le proporciona suficiente cantidad de datos.
- Sin embargo, en muchos otros casos no disponemos de suficientes datos de entrenamiento para la tarea que nos interesa, y en estos casos proporcionar a la red los conceptos generales más explícitos puede ser muy valioso.

## 1.9. Historia

Los orígenes de PLN se remontan a los años 50 con el famoso test de Alan Turing: una máquina será considerada inteligente cuando sea capaz de conversar con una persona sin que esta pueda determinar si está hablando con una máquina o un ser humano. A lo largo de su historia la disciplina ha tenido tres grandes períodos: 1) el racionalismo, 2) el empirismo, y 3) el aprendizaje profundo [Deng y Liu, 2018] que describimos a continuación.

El racionalismo abarca desde 1950 a 1990, donde las soluciones consistían en diseñar reglas manuales para incorporar mecanismos de conocimiento y razonamiento. Un ejemplo emblemático es el agente de conversación (o chatbot) ELIZA desarrollado por Joseph Weizenbaum que simulaba un psicoterapeuta rogeriano. Luego, a partir de la década de los 90s, el diseño de métodos estadísticos y de aprendizaje automático construidos sobre corpus llevan a PLN hacia un enfoque empírista. Las reglas ya no se construyen sino que se “aprenden” a partir de datos etiquetados. Algunos modelos representativos de esta época son los filtros de spam basados en modelos lineales, las cadenas de Markov ocultas para la extracción de categorías sintácticas y los modelos probabilísticos de IBM para la traducción automática. Estos modelos se caracterizaban por ser poco profundos en su estructura de parámetros y por depender de características manualmente diseñadas para representar la entrada.

A partir del año 2010, las redes neuronales artificiales, que son una familia de modelos de aprendizaje automático, comienzan a mostrar resultados muy superiores en varias tareas emblemáticas de PLN [Collobert et al., 2011]. La idea de estos modelos es representar la entrada (el texto) con una jerarquía de parámetros (o capas) que permiten encontrar representaciones idóneas para la tarea en cuestión, proceso al cual se refiere como “aprendizaje profundo”. Estos modelos se caracterizan por tener muchos más parámetros que los modelos anteriores (superando la barrera del millón en algunos casos) y requerir grandes volúmenes de datos para su entrenamiento. Una gracia de estos modelos es que pueden ser pre-entrenados con texto no etiquetado como libros, Wikipedia, texto de redes sociales y de la Web para encontrar representaciones iniciales de palabras y oraciones (a lo que conocemos como word embeddings), las cuales pueden ser posteriormente adaptadas para la tarea objetivo donde sí se tienen datos etiquetados (Proceso conocido como transfer learning). Aquí destacamos modelos como Word2Vec [Mikolov 2013], BERT [Devlin 2018] y

GPT-3 [Brown 2020].

Este tipo de modelos ha ido perfeccionándose en los últimos años, llegando a obtener resultados cada vez mejores para casi todos los problemas del área [NLPProgress]. Sin embargo, este progreso no ha sido libre de controversias. El aumento exponencial en la cantidad de parámetros de cada nuevo modelo respecto a su predecesor, hace que los recursos computacionales y energéticos necesarios para construirlos sólo estén al alcance de unos pocos. Además, varios estudios han mostrado que estos modelos aprenden y reproducen los sesgos y prejuicios (ej: género, religión, racial) presentes en los textos a partir de los cuales se entrena. Sin ir más lejos, la investigadora Timnit Gebru fue despedida de Google cuando se le negó el permiso para publicar un artículo que ponía de manifiesto estos problemas [Bender 2021].

El progreso de la PNL se puede dividir en tres oleadas principales: 1) racionalismo, 2) empirismo y 3) aprendizaje profundo [Deng and Liu, 2018].

- 1950 - 1990 Racionalismo: se enfocaba en diseñar reglas hechas a mano para incorporar conocimiento y mecanismos de razonamiento en sistemas de PNL inteligentes (por ejemplo, ELIZA para simular a un psicoterapeuta Rogeriano, MARGIE para estructurar información del mundo real en ontologías de conceptos).
- 1991 - 2009 Empirismo: se caracteriza por la explotación de corpora de datos y modelos de aprendizaje automático y estadísticos (superficiales) (por ejemplo, Naive Bayes, HMMs, modelos de traducción IBM).
- 2010 - Aprendizaje Profundo: la ingeniería de características (considerada como un cuello de botella) se reemplaza con el aprendizaje de representaciones y/o redes neuronales profundas (por ejemplo, <https://www.deepl.com/translator>). Un artículo muy influyente en esta revolución: [Collobert et al., 2011].

## 1.10. Conclusiones

En este capítulo, hemos explorado el desafío de entender y producir lenguaje utilizando computadoras. El aprendizaje automático supervisado es una de las principales técnicas utilizadas para abordar este desafío. Además, hemos discutido las propiedades desafiantes del lenguaje, como la discreción, la composicionalidad y la dispersión. Estos aspectos nos muestran la complejidad inherente al procesamiento del lenguaje natural y nos desafían a encontrar soluciones efectivas.

---

<sup>1</sup>Las fechas son aproximadas.

## Capítulo 2

# Modelo de Espacio Vectorial y Recuperación de Información

- ¿Cómo recupera un motor de búsqueda, como Duckduckgo o Google, los documentos relevantes a partir de una consulta dada?
- ¿Cómo puede una empresa procesar las reclamaciones dejadas por sus usuarios en sus portales web?

Estos problemas se estudian en los siguientes campos:

- *Recuperación de Información*: ciencia de buscar información en colecciones de documentos.
- *Minería de Texto*: extracción automática de conocimiento a partir de texto.

¡Ambos están estrechamente relacionados con el Procesamiento del Lenguaje Natural (NLP, por sus siglas en inglés)! (las fronteras entre estos campos no están claras).

### 2.1. Tokens y Tipos

Tokenización: la tarea de dividir una oración o documento en fragmentos llamados *tokens*.

Se pueden emplear transformaciones adicionales, como la eliminación de caracteres especiales (por ejemplo, puntuación), minúsculas, etc. [Manning et al., 2008].

**Ejemplo** Entrada: Me gustan los lenguajes humanos y los lenguajes de programación.

Tokens: [Me] [gustan] [los] [lenguajes] [humanos] [y] [los] [lenguajes] [de] [programación]

## Tipos

- Un *tipo* es una clase de *token* que contiene una única secuencia de caracteres.
- Se obtienen identificando los tokens únicos dentro del documento.

Tipos para la oración anterior: [Me] [gustan] [los] [lenguajes] [humanos] [y] [de] [programación] El token *lenguajes* se repitió en la oración.

## Extracción de Vocabulario

- Un *término* es un *tipo* normalizado.
- La normalización es el proceso de crear clases de equivalencia de diferentes *tipos*. Esto quedará claro en las siguientes diapositivas.
- El vocabulario *V* es el conjunto de términos (tokens únicos normalizados) dentro de una colección de documentos o corpus *D*.

## Eliminación de stopwords

- Con el fin de reducir el tamaño del vocabulario y eliminar términos que no aportan mucha información, se eliminan los términos que ocurren con alta frecuencia en el corpus.
- Estos términos se llaman *stopwords* e incluyen artículos, pronombres, preposiciones y conjunciones. Ejemplo: [un, una, y, cualquier, tiene, hacer, no, hizo, el, en].

¡La eliminación de stopwords puede ser inconveniente en muchas tareas de procesamiento del lenguaje natural!

Ejemplo: No me gusta la pizza => pizza (se eliminaron "no", "mez" "gusta")

**Stemming** Es un proceso de normalización de términos en el cual los términos se transforman a su raíz con el objetivo de reducir el tamaño del vocabulario. Se lleva a cabo aplicando reglas de reducción de palabras. Ejemplo: Algoritmo de Porter.

(F)	Rule	Example
SSES	→ SS	caresses → caress
IES	→ I	ponies → poni
SS	→ SS	caress → caress
S	→	cats → cat

Ejemplo: *d* = Me gustan los lenguajes humanos y los lenguajes de programación => Me gustan los lenguaj y los program lenguaj<sup>1</sup>

El vocabulario del documento *d* después de eliminar stopwords y realizar stemming:

<sup>1</sup>[http://9ol.es/porter\\_js\\_demo.html](http://9ol.es/porter_js_demo.html)

termId	value
t1	human
t2	languag
t3	program

## Lematización

- Otra estrategia de normalización de términos.
- También transforma las palabras en sus raíces.
- Realiza un análisis morfológico utilizando diccionarios de referencia (tablas de búsqueda) para crear clases de equivalencia entre *tipos*.
- Por ejemplo, para el token *estudios*, una regla de stemming devolvería el término *estudi*, mientras que a través de la lematización obtendríamos el término *study*<sup>2</sup>.

### 2.1.1. Ley de Zipf

- La Ley de Zipf, propuesta por George Kingsley Zipf en [Zipf, 1935], es una ley empírica sobre la frecuencia de los términos dentro de una colección de documentos (**corpus**).
- Establece que la frecuencia  $f$  de un término en un corpus es inversamente proporcional a su posición  $r$  en una tabla de frecuencia ordenada:

$$f = \frac{cf}{r^\beta} \quad (2.1)$$

- Donde  $cf$  es una constante dependiente de la colección y  $\beta > 0$  es un factor de decaimiento.
- Si  $\beta = 1$ , entonces  $f$  sigue exactamente la Ley de Zipf; de lo contrario, sigue una distribución similar a la de Zipf.
- La ley se relaciona con el principio del mínimo esfuerzo. A menudo utilizamos pocas palabras para expresar ideas.
- La Ley de Zipf es un tipo de distribución de ley de potencia (distribuciones de cola larga).
- Si trazamos un gráfico de *log-log*, obtenemos una línea recta con una pendiente de  $-\beta$ .
- Enumerar las palabras más frecuentes de un corpus se puede utilizar para construir una lista de *stopwords*.

---

<sup>2</sup><https://blog.bitext.com/what-is-the-difference-between-stemming-and-lemmatization/>

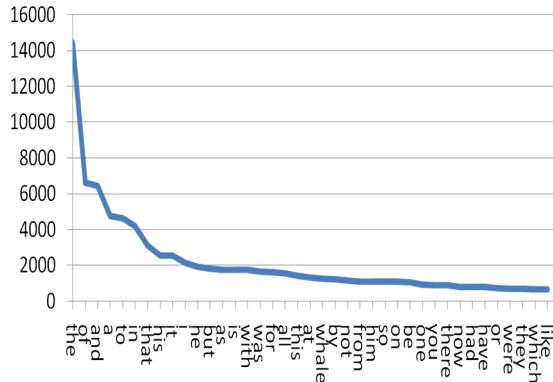


Figura 2.1: Ley de Zipf

### 2.1.2. Listas de publicaciones y el índice invertido

Sea  $D$  una colección de documentos y  $V$  el vocabulario de todos los términos extraídos de la colección:

- La lista de publicaciones de un término es la lista de todos los documentos donde el término aparece al menos una vez. Los documentos se identifican por sus identificadores.
- Un índice invertido es una estructura de datos tipo diccionario que mapea los términos  $t_i \in V$  con sus listas de publicaciones correspondientes.

$\langle \text{término} \rangle \rightarrow \langle \text{idDocumento} \rangle^*$

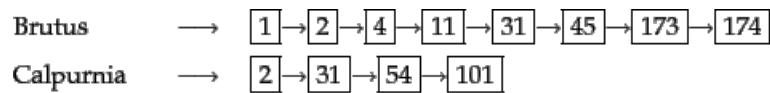


Figura 2.2: Índice invertido

### 2.1.3. Motores de búsqueda web

Un motor de búsqueda es un sistema de recuperación de información diseñado para buscar información en la web (satisfacer necesidades de información) [Manning et al., 2008]. Sus componentes básicos son:

- Rastreador: un robot que navega por la web según una estrategia definida. Por lo general, comienza navegando por un conjunto de sitios web iniciales y continúa navegando a través de sus enlaces.

- Indexador: se encarga de mantener un índice invertido con el contenido de las páginas recorridas por el rastreador.
- Procesador de consultas: se encarga de procesar las consultas de los usuarios y buscar en el índice los documentos más relevantes para una consulta.
- Función de clasificación: la función utilizada por el procesador de consultas para clasificar los documentos indexados en la colección por relevancia según una consulta.
- Interfaz de usuario: recibe la consulta como entrada y devuelve los documentos clasificados por relevancia.

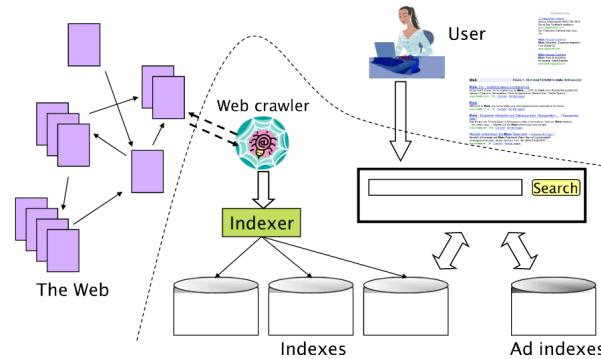


Figura 2.3: Los diversos componentes de un motor de búsqueda web [Manning et al., 2008].

## 2.2. El modelo de espacio vectorial

- Para clasificar consultas o medir la similitud entre dos documentos, necesitamos una métrica de similitud.
- Los documentos pueden ser *representados* como vectores de términos, donde cada término es una dimensión del vector [Salton et al., 1975].
- Documentos con diferentes palabras y longitudes residirán en el mismo espacio vectorial.
- Este tipo de representaciones se llaman *Bolsa de Palabras* (Bag of Words).
- En las representaciones de bolsa de palabras, se pierde el orden de las palabras y la estructura lingüística de una oración.

- El valor de cada dimensión es un peso que representa la relevancia del término  $t_i$  en el documento  $d$ .

$$d_j \rightarrow \vec{d}_j = (w(t_1, d_j), \dots, w(t_{|V|}, d_j)) \quad (2.2)$$

- ¿Cómo podemos modelar la información que aporta un término a un documento?

### Frecuencia de Término - Frecuencia Inversa de Documento

- Sea  $tf_{i,j}$  la frecuencia del término  $t_i$  en el documento  $d_j$ .
- Un término que ocurre 10 veces debería proporcionar más información que uno que ocurre solo una vez.
- ¿Qué ocurre cuando tenemos documentos que son mucho más largos que otros?
- Podemos normalizar dividiendo por la frecuencia máxima del término en el documento.

$$ntf_{i,j} = \frac{tf_{i,j}}{\max_i(tf_{i,j})}$$

- ¿Un término que ocurre en muy pocos documentos proporciona más o menos información que uno que ocurre varias veces?
- Por ejemplo, el documento *El respetado alcalde de Pelotillehue*. El término *Pelotillehue* ocurre en menos documentos que el término *alcalde*, por lo que debería ser más descriptivo.
- Sea  $N$  el número de documentos en la colección y  $n_i$  el número de documentos que contienen el término  $t_i$ , definimos la frecuencia inversa de documento (*idf*) de  $t_i$  de la siguiente manera:

$$idf_{t_i} = \log_{10} \left( \frac{N}{n_i} \right)$$

- Un término que aparece en todos los documentos tendría  $idf = 0$ , y uno que aparece en el 10 % de los documentos tendría  $idf = 1$ .
- El modelo de puntuación *tf-idf* combina las puntuaciones de *tf* e *idf*, y resulta en los siguientes pesos  $w$  para un término en un documento:

$$w(t_i, d_j) = tf_{i,j} \times \log_{10} \left( \frac{N}{n_i} \right)$$

- Las consultas de los motores de búsqueda también pueden ser modeladas como vectores. Sin embargo, en promedio, las consultas suelen tener entre 2 y 3 términos. Para evitar tener demasiadas dimensiones nulas, los vectores de consulta pueden suavizarse de la siguiente manera:

$$w(t_i, d_j) = (0,5 + 0,5 \times tf_{i,j}) \log_{10} \left( \frac{N}{n_i} \right)$$

### 2.2.1. Similitud entre vectores

- Representar consultas y documentos como vectores permite calcular su similitud.
- Un enfoque podría ser utilizar la distancia euclíadiana.
- El enfoque común es calcular el coseno del ángulo entre los dos vectores.
- Si ambos documentos son iguales, el ángulo sería 0 y su coseno sería 1. Por otro lado, si son ortogonales, el coseno es 0.
- La similitud del coseno se calcula de la siguiente manera:

$$\text{similitud del coseno}(\vec{d}_1, \vec{d}_2) = \frac{\vec{d}_1 \cdot \vec{d}_2}{|\vec{d}_1| \times |\vec{d}_2|} = \frac{\sum_{i=1}^{|V|} (w(t_i, d_1) \times w(t_i, d_2))}{\sqrt{\sum_{i=1}^{|V|} w(t_i, d_1)^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^{|V|} w(t_i, d_2)^2}}$$

- Esto se llama incorrectamente "distancia del coseno". En realidad, es una métrica de similitud.
- Observa que la similitud del coseno normaliza los vectores por su norma euclíadiana  $\|\vec{d}\|_2$ .

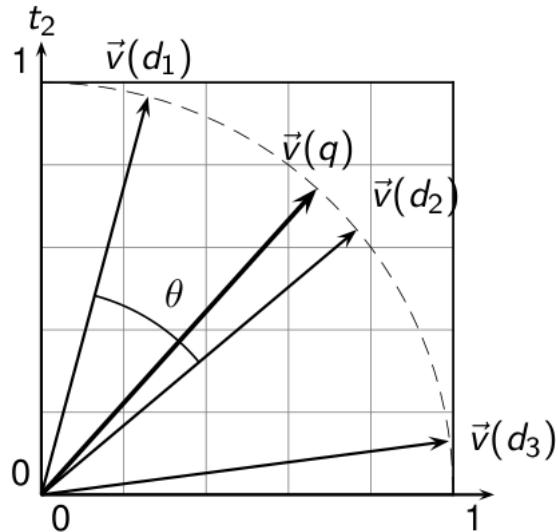


Figura 2.4: Similitud del coseno.

### Ejercicio

- Supongamos que tenemos 3 documentos formados a partir de las siguientes secuencias de términos:  $d_1 \rightarrow t_4t_3t_1t_4$   $d_2 \rightarrow t_5t_4t_2t_3t_5$   $d_3 \rightarrow t_2t_1t_4t_4$
- Construye una matriz término-documento de dimensiones  $5 \times 3$  utilizando pesos simples de  $tf\text{-}idf$  (sin normalización).
- Recomendamos que primero construyas una lista con el número de documentos en los que aparece cada término (útil para calcular los valores de  $idf$ ).
- Luego, calcula los valores de  $idf$  para cada término.
- Rellena las celdas de la matriz con los valores de  $tf\text{-}idf$ .
- ¿Cuál es el documento más cercano a  $d_1$ ?

	d1	d2	d3
t1	0.176	0.000	0.176
t2	0.000	0.176	0.176
t3	0.176	0.176	0.000
t4	0.000	0.000	0.000
t5	0.000	0.954	0.000

Cuadro 2.1: Matriz tf-idf

## 2.3. Agrupamiento de Documentos

- ¿Cómo podemos agrupar documentos que son similares entre sí?
- El agrupamiento es el proceso de agrupar documentos que son similares entre sí.
- Cada grupo de documentos se llama *cluster* o grupo.
- En el agrupamiento, intentamos identificar grupos de documentos en los que la similitud entre documentos en el mismo grupo se maximiza y la similitud de documentos en diferentes grupos se minimiza.
- El agrupamiento de documentos permite identificar temas en un corpus y reducir el espacio de búsqueda en un motor de búsqueda, es decir, el índice invertido se organiza según los grupos.
- K-means es un algoritmo de agrupamiento simple que recibe el número de grupos  $k$  como parámetro.

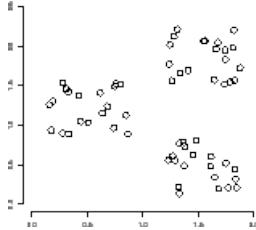


Figura 2.5: Conjunto de documentos donde los grupos se pueden identificar claramente.

- El algoritmo se basa en la idea de *centroide*, que es el vector promedio de los documentos que pertenecen al mismo grupo.
- Sea  $S$  un conjunto de vectores bidimensionales  $3, 6, 1, 2, 5, 1$ , el centroide de  $S$  es  $(3 + 1 + 5)/3, (6 + 2 + 1)/3 = 3, 3$ .

### 2.3.1. K-Means

1. Comenzamos con  $k$  centroides aleatorios.
2. Calculamos la similitud entre cada documento y cada centroide.
3. Asignamos cada documento a su centroide más cercano formando un grupo.
4. Se recalculan los centroides de acuerdo a los documentos asignados a ellos.
5. Este proceso se repite hasta la convergencia.

## 2.4. Conclusiones y Conceptos Adicionales

- Representar documentos como vectores es fundamental para calcular similitudes entre pares de documentos.
- Los vectores de "bag of words" carecen de estructura lingüística.
- Los vectores de "bag of words" son de alta dimensionalidad y dispersos.
- Los n-gramas de palabras pueden ayudar a capturar expresiones de múltiples palabras (por ejemplo, New York => new\_york)
- Los sistemas modernos de recuperación de información van más allá de la similitud de vectores (PageRank, Retroalimentación de relevancia, Minería de registros de consultas, Grafo de conocimiento de Google, Aprendizaje automático).

```

K-MEANS( $\{\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_N\}, K$ )
1  $(\vec{s}_1, \vec{s}_2, \dots, \vec{s}_K) \leftarrow \text{SELECTRANDOMSEEDS}(\{\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_N\}, K)$ 
2 for  $k \leftarrow 1$  to  $K$ 
3 do  $\vec{\mu}_k \leftarrow \vec{s}_k$ 
4 while stopping criterion has not been met
5 do for  $k \leftarrow 1$  to  $K$ 
6   do  $\omega_k \leftarrow \{\}$ 
7   for  $n \leftarrow 1$  to  $N$ 
8   do  $j \leftarrow \arg \min_{j'} |\vec{\mu}_{j'} - \vec{x}_n|$ 
9      $\omega_j \leftarrow \omega_j \cup \{\vec{x}_n\}$  (reassignment of vectors)
10    for  $k \leftarrow 1$  to  $K$ 
11    do  $\vec{\mu}_k \leftarrow \frac{1}{|\omega_k|} \sum_{\vec{x} \in \omega_k} \vec{x}$  (recomputation of centroids)
12 return  $\{\vec{\mu}_1, \dots, \vec{\mu}_K\}$ 

```

Figura 2.6: Algoritmo K-means

- La recuperación de información y la minería de textos se preocupan menos por la estructura lingüística y más por producir algoritmos rápidos y escalables [Eisenstein, 2018].

## Capítulo 3

# Modelos de Lenguaje Probabilísticos

### 3.1. El Problema del Modelado del Lenguaje

- Tenemos un vocabulario (finito), digamos  $\mathcal{V} = \{\text{el, un, hombre, telescopio, Beckham, dos, ...}\}$
- Tenemos un conjunto (infinito) de cadenas,  $\mathcal{V}^*$ .
- Por ejemplo:
  - el STOP
  - un STOP
  - el fan STOP
  - el fan vio a Beckham STOP
  - el fan vio vio STOP
  - el fan vio a Beckham jugar para el Real Madrid STOP
- Donde STOP es un símbolo especial que indica el final de una oración.
- Tenemos una muestra de entrenamiento de ejemplos de oraciones en inglés.
- Necesitamos “aprender” una distribución de probabilidad  $p$ .
- $p$  es una función que satisface:

$$\sum_{x \in V^*} p(x) = 1$$
$$p(x) \geq 0 \quad \text{para todo } x \in V^*$$

- Ejemplos de probabilidades asignadas a las oraciones:

$$p(\text{el STOP}) = 10^{-12}$$

$$p(\text{el fan STOP}) = 10^{-8}$$

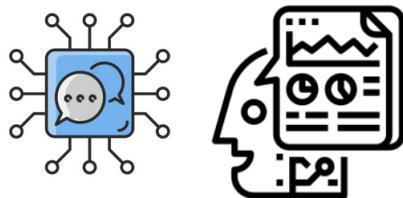
$$p(\text{el fan vio a Beckham STOP}) = 2 \times 10^{-8}$$

$$p(\text{el fan vio vio STOP}) = 10^{-15}$$

...

$$p(\text{el fan vio a Beckham jugar para el Real Madrid STOP}) = 2 \times 10^{-9}$$

- Idea 1: El modelo asigna una probabilidad más alta a las oraciones fluidas (aquellas que tienen sentido y son gramaticalmente correctas).
- Idea 2: Estimar esta función de probabilidad a partir del texto (corpus).
- El modelo de lenguaje ayuda a los modelos de generación de texto a distinguir entre buenas y malas oraciones.



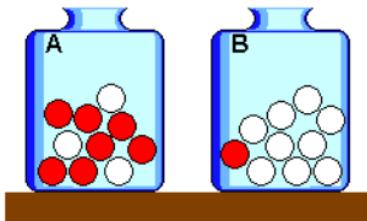
### 3.1.1. ¿Por qué queríamos hacer esto?

- El reconocimiento del habla fue la motivación original.
- Considera las oraciones: 1) reconocer el habla y 2) arruinar una playa bonita.
- Estas dos oraciones suenan muy similares al ser pronunciadas, lo que dificulta que los sistemas automáticos de reconocimiento del habla las transcriban con precisión.
- Cuando el sistema de reconocimiento del habla analiza la entrada de audio e intenta transcribirlo, tiene en cuenta las probabilidades del modelo de lenguaje para determinar la interpretación más probable.
- El modelo de lenguaje favorecería  $p(\text{reconocer el habla})$  sobre  $p(\text{arruinar una playa bonita})$ .
- Esto se debe a que la primera oración es más común y debería ocurrir con más frecuencia en el corpus de entrenamiento.

- Al incorporar modelos de lenguaje, los sistemas de reconocimiento del habla pueden mejorar la precisión al seleccionar la oración que se alinea mejor con los patrones lingüísticos y el contexto, incluso cuando se enfrentan a alternativas que suenan similar.
- Problemas relacionados son el reconocimiento óptico de caracteres y el reconocimiento de escritura a mano.
- De hecho, los modelos de lenguaje son útiles en cualquier tarea de procesamiento del lenguaje natural que involucre la generación de lenguaje (por ejemplo, traducción automática, resumen, chatbots).
- Las técnicas de estimación desarrolladas para este problema serán MUY útiles para otros problemas en el procesamiento del lenguaje natural.

### 3.1.2. Los Modelos de Lenguaje son Generativos

- Los modelos de lenguaje pueden generar oraciones al muestrear secuencialmente a partir de las probabilidades.
- Esto es análogo a extraer bolas (palabras) de una urna donde sus tamaños son proporcionales a sus frecuencias relativas.
- Alternativamente, uno siempre podría extraer la palabra más probable, lo cual es equivalente a predecir la siguiente palabra.



## 3.2. ¿Por qué los modelos de lenguaje son importantes?

Los modelos de lenguaje son fundamentales en el procesamiento del lenguaje natural. Ayudan a abordar desafíos como el reconocimiento del habla, la transcripción automática y la generación de texto. Al comprender y estimar la probabilidad de ocurrencia de las secuencias de palabras, los modelos de

lenguaje mejoran la precisión y la calidad en diversas aplicaciones de procesamiento del lenguaje natural.

Los modelos de lenguaje permiten a los sistemas de reconocimiento del habla distinguir entre diferentes interpretaciones de palabras o frases que suenan similar pero tienen significados distintos. Esto es especialmente importante en situaciones en las que la ambigüedad podría llevar a una interpretación errónea. Al utilizar las probabilidades del modelo de lenguaje, los sistemas de reconocimiento del habla pueden seleccionar la interpretación más probable y coherente en función del contexto.

Además, los modelos de lenguaje son esenciales en tareas generativas, como la traducción automática, la generación de resúmenes y la creación de chatbots. Estos modelos ayudan a generar texto coherente y natural al muestrear secuencialmente palabras de acuerdo con sus probabilidades estimadas.

Las técnicas desarrolladas para el problema del modelado del lenguaje son también aplicables a otros desafíos en el procesamiento del lenguaje natural. Los avances en la estimación de probabilidades y en la generación de texto tienen un impacto significativo en campos como la inteligencia artificial, la lingüística computacional y la comunicación basada en texto.

En resumen, los modelos de lenguaje desempeñan un papel crucial en la comprensión y generación de texto, mejorando la precisión, la coherencia y la calidad en diversas aplicaciones de procesamiento del lenguaje natural. Son herramientas fundamentales para avanzar en la comprensión y la capacidad de interacción de las máquinas con el lenguaje humano.

### 3.2.1. Un Método Ingenuo

- Un método muy ingenuo para estimar la probabilidad de una oración es contar las apariciones de la oración en los datos de entrenamiento y dividirlo por el número total de oraciones de entrenamiento ( $N$ ) para estimar la probabilidad.
- Tenemos  $N$  oraciones de entrenamiento.
- Para cualquier oración  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ,  $c(x_1, x_2, \dots, x_n)$  es el número de veces que se ha visto la oración en nuestros datos de entrenamiento.
- Una estimación ingenua:

$$p(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{c(x_1, x_2, \dots, x_n)}{N}$$

- Problema: A medida que el número de posibles oraciones crece de manera exponencial con la longitud de las oraciones y el tamaño del vocabulario, se vuelve cada vez más improbable que una oración específica aparezca en los datos de entrenamiento.
- En consecuencia, muchas oraciones tendrán una probabilidad cero según el modelo ingenuo, lo que lleva a una mala generalización.

### 3.3. Procesos de Markov

- Considera una secuencia de variables aleatorias  $X_1, X_2, \dots, X_n$ .
- Cada variable aleatoria puede tomar cualquier valor en un conjunto finito  $V$ .
- Por ahora, asumimos que la longitud  $n$  está fija (por ejemplo,  $n = 100$ ).
- Nuestro objetivo: modelar  $P(X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n)$

**Procesos de Markov de primer orden** Un proceso de Markov de primer orden asume que la probabilidad de que una variable aleatoria tome un valor depende únicamente del valor inmediatamente anterior en la secuencia. En el contexto del modelado del lenguaje, esto significa que la probabilidad de una palabra en una oración depende solo de la palabra anterior. La probabilidad conjunta de una secuencia de palabras se calcula multiplicando las probabilidades condicionales de las palabras sucesivas dado su predecesor inmediato. Esta es la suposición de Markov de primer orden:

$$P(X_i = x_i | X_1 = x_1, \dots, X_{i-1} = x_{i-1}) = P(X_i = x_i | X_{i-1} = x_{i-1})$$

**Procesos de Markov de segundo orden** Un proceso de Markov de segundo orden amplía la suposición de Markov de primer orden y considera el valor de dos variables anteriores en la secuencia. En el modelado del lenguaje, esto significa que la probabilidad de una palabra en una oración depende de las dos palabras anteriores. La probabilidad conjunta de una secuencia de palabras se calcula multiplicando las probabilidades condicionales de las palabras sucesivas dado sus dos predecesores inmediatos. La suposición de Markov de segundo orden es la siguiente:

$$P(X_i = x_i | X_1 = x_1, \dots, X_{i-2} = x_{i-2}, X_{i-1} = x_{i-1}) = P(X_i = x_i | X_{i-2} = x_{i-2}, X_{i-1} = x_{i-1})$$

#### 3.3.1. Modelado de secuencias de longitud variable

Si queremos modelar secuencias de longitud variable, podemos considerar que la longitud de la secuencia,  $n$ , también es una variable aleatoria. Una forma simple de abordar esto es siempre definir  $X_n = \text{STOP}$ , donde "STOP" es un símbolo especial que marca el final de la secuencia. Luego, podemos usar un proceso de Markov como antes para modelar la probabilidad conjunta de las palabras en la secuencia:

$$P(X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i = x_i | X_{i-2} = x_{i-2}, X_{i-1} = x_{i-1})$$

Aquí, asumimos que  $x_0 = x_{-1} = *$  por conveniencia, donde " $*$ " es un símbolo especial de "inicio".

### 3.4. Modelos de lenguaje trigram

Un modelo de lenguaje trigram consiste en:

1. Un conjunto finito  $V$  de palabras.
2. Un parámetro  $q(w|u, v)$  para cada trigram  $u, v, w$  donde  $w \in V \cup \{\text{STOP}\}$  y  $u, v \in V \cup \{*\}$ .

Para cualquier oración  $x_1 \dots x_n$ , donde  $x_i \in V$  para  $i = 1 \dots (n - 1)$  y  $x_n = \text{STOP}$ , la probabilidad de la oración según el modelo de lenguaje trigram es:

$$p(x_1 \dots x_n) = \prod_{i=1}^n q(x_i|x_{i-2}, x_{i-1})$$

Aquí, definimos  $x_0 = x_{-1} = *$  por conveniencia.

**Un ejemplo** Para la oración "the dog barks STOP", tendríamos:

$$p(\text{the dog barks STOP}) = q(\text{the}|*, *) \times q(\text{dog}|*, \text{the}) \times q(\text{barks}|\text{the}, \text{dog}) \times q(\text{STOP}|\text{dog}, \text{barks})$$

#### 3.4.1. El problema de estimación trigram

El problema de estimación restante es determinar los valores de los parámetros  $q(w_i|w_{i-2}, w_{i-1})$ . Por ejemplo:

$$q(\text{laughs}|\text{the}, \text{dog})$$

Una estimación natural (la "estimación de máxima verosimilitud") es la siguiente:

$$q(w_i|w_{i-2}, w_{i-1}) = \frac{\text{Count}(w_{i-2}, w_{i-1}, w_i)}{\text{Count}(w_{i-2}, w_{i-1})}$$

Por ejemplo:

$$q(\text{laughs}|\text{the}, \text{dog}) = \frac{\text{Count}(\text{the}, \text{dog}, \text{laughs})}{\text{Count}(\text{the}, \text{dog})}$$

**Problemas de datos dispersos** Una estimación natural (la "estimación de máxima verosimilitud") es la siguiente:

$$q(w_i|w_{i-2}, w_{i-1}) = \frac{\text{Count}(w_{i-2}, w_{i-1}, w_i)}{\text{Count}(w_{i-2}, w_{i-1})}$$

$$q(\text{laughs}|\text{the}, \text{dog}) = \frac{\text{Count}(\text{the}, \text{dog}, \text{laughs})}{\text{Count}(\text{the}, \text{dog})}$$

- Supongamos que el tamaño del vocabulario es  $N = |V|$ , entonces hay  $N^3$  parámetros en el modelo.
- Por ejemplo, si  $N = 20,000$ , entonces  $20,000^3 = 8 \times 10^{12}$  parámetros.

### 3.5. Evaluación de un modelo de lenguaje: Perplejidad

- Tenemos algunos datos de prueba,  $m$  oraciones:  $s_1, s_2, s_3, \dots, s_m$
- Podemos analizar la probabilidad bajo nuestro modelo  $\prod_{i=1}^m p(s_i)$ . O más convenientemente, la probabilidad logarítmica:

$$\log \left( \prod_{i=1}^m p(s_i) \right) = \sum_{i=1}^m \log p(s_i)$$

- De hecho, la medida de evaluación habitual es la perplejidad:

$$\text{Perplejidad} = 2^{-l} \quad \text{donde} \quad l = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^m \log p(s_i)$$

- $M$  es el número total de palabras en los datos de prueba.

#### Algo de intuición sobre la perplejidad

- Supongamos que tenemos un vocabulario  $V$ , y  $N = |V| + 1$ , y un modelo que predice:

$$q(w|u, v) = \frac{1}{N} \quad \text{para todo } w \in V \cup \{\text{STOP}\}, \text{ para todo } u, v \in V \cup \{*\}$$

- Es fácil calcular la perplejidad en este caso:

$$\text{Perplejidad} = 2^{-l} \quad \text{donde} \quad l = \log \frac{1}{N} \Rightarrow \text{Perplejidad} = N$$

- La perplejidad se puede ver como una medida del "factor de ramificación". efectivo.
- **Demostración:** Supongamos que tenemos  $m$  oraciones de longitud  $n$  en el corpus, y  $M$  es la cantidad de tokens en el corpus,  $M = m \cdot n$ .
- Consideraremos el logaritmo (base 2) de la probabilidad de una oración  $s = w_1 w_2 \dots w_n$  bajo el modelo:

$$\log p(s) = \log \prod_{i=1}^n q(w_i|w_{i-2}, w_{i-1}) = \sum_{i=1}^n \log q(w_i|w_{i-2}, w_{i-1})$$

- Dado que cada  $q(w_i|w_{i-2}, w_{i-1})$  es igual a  $\frac{1}{N}$ , tenemos:

$$\log p(s) = \sum_{i=1}^n \log \frac{1}{N} = n \cdot \log \frac{1}{N} = -n \cdot \log N$$

$$l = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^m \log p(s_i) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^m -n \cdot \log N = \frac{1}{M} \cdot -m \cdot n \cdot \log N = -\log N$$

- Por lo tanto, la perplejidad está dada por:

$$\text{Perplejidad} = 2^{-l} = 2^{-(-\log N)} = N$$

### 3.5.1. El trade-off entre sesgo y varianza

En el contexto de los modelos de lenguaje, el trade-off entre sesgo y varianza se refiere a la compensación entre la simplicidad del modelo y su capacidad para capturar la complejidad y la variabilidad de los datos de lenguaje.

- Modelos más simples, como los modelos de n-gramas de orden inferior, tienen un sesgo más alto pero una varianza más baja. Estos modelos asumen independencia condicional entre las palabras y simplifican la estructura del lenguaje.
- Modelos más complejos, como los modelos basados en redes neuronales, tienen una varianza más alta pero un sesgo más bajo. Estos modelos pueden capturar relaciones más complejas entre las palabras, pero también son más propensos a sobreajustar los datos de entrenamiento y tener dificultades para generalizar a nuevas muestras.

### 3.5.2. Estimación de máxima verosimilitud y overfitting

La estimación de máxima verosimilitud (MLE) es una técnica común para estimar los parámetros de un modelo de lenguaje. Sin embargo, los modelos de lenguaje basados en MLE pueden sufrir de overfitting (sobreajuste) a los datos de entrenamiento.

- Cuando se entrena un modelo de lenguaje con MLE, se maximiza la probabilidad de los datos de entrenamiento. Esto puede llevar a la asignación de probabilidades altas a secuencias específicas que aparecen en los datos de entrenamiento, incluso si esas secuencias son poco probables en la distribución real del lenguaje.
- Como resultado, el modelo puede tener un rendimiento deficiente en datos de prueba que contienen secuencias diferentes a las del conjunto de entrenamiento. Esto se debe a que el modelo se ha sobreajustado a los datos de entrenamiento y ha capturado sus características específicas en lugar de aprender patrones más generales del lenguaje.

### 3.5.3. Técnicas de regularización

Para abordar el problema del overfitting en modelos de lenguaje, se utilizan diversas técnicas de regularización. Estas técnicas ayudan a reducir la varianza del modelo y mejorar su capacidad de generalización.

Algunas técnicas comunes de regularización para modelos de lenguaje incluyen:

- **Suavizado de Laplace (Laplace smoothing):** Se agrega una cantidad pequeña a todas las cuentas de n-gramas para evitar la asignación de una probabilidad cero a n-gramas no observados en los datos de entrenamiento.
- **Suavizado de interpolación (Interpolation smoothing):** Se combina la distribución de probabilidad estimada por un modelo de n-gramas con las distribuciones estimadas por modelos de orden inferior. Esto permite incorporar información de n-gramas de orden inferior y reduce la varianza del modelo.
- **Modelos de interpolación de Kneser-Ney (Kneser-Ney interpolation models):** Estos modelos utilizan una técnica de suavizado específica (Kneser-Ney) que considera la frecuencia de unigramas y la frecuencia de n-gramas en contexto específicos para asignar probabilidades a n-gramas no observados.
- **Regularización de peso máximo (Weighted maximum likelihood regularization):** Se aplica una regularización que reduce los pesos de las cuentas de n-gramas más frecuentes. Esto ayuda a reducir la varianza y mejorar el rendimiento en datos de prueba.

Estas técnicas de regularización ayudan a controlar la varianza del modelo y a mitigar el overfitting, permitiendo un mejor equilibrio entre el sesgo y la varianza y mejorando la generalización a nuevas muestras.

## 3.6. Interpolación Lineal

- Tomamos nuestra estimación  $q(w_i|w_{i-2}, w_{i-1})$  como:
$$q(w_i|w_{i-2}, w_{i-1}) = \lambda_1 \cdot q_{\text{ML}}(w_i|w_{i-2}, w_{i-1}) + \lambda_2 \cdot q_{\text{ML}}(w_i|w_{i-1}) + \lambda_3 \cdot q_{\text{ML}}(w_i)$$
donde  $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$ , y  $\lambda_i \geq 0$  para todo  $i$ .
- Nuestra estimación define correctamente una distribución (definimos  $V' =$

$V \cup \{\text{STOP}\}$ ):

$$\begin{aligned}
& \sum_{w \in V'} q(w|u, v) \\
&= \sum_{w \in V'} [\lambda_1 \cdot q_{\text{ML}}(w|u, v) + \lambda_2 \cdot q_{\text{ML}}(w|v) + \lambda_3 \cdot q_{\text{ML}}(w)] \\
&= \lambda_1 \sum_w q_{\text{ML}}(w|u, v) + \lambda_2 \sum_w q_{\text{ML}}(w|v) + \lambda_3 \sum_w q_{\text{ML}}(w) \\
&= \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1
\end{aligned}$$

- También podemos demostrar que  $q(w|u, v) \geq 0$  para todo  $w \in V'$ .

### 3.7. Estimación de los Valores $\lambda$

- Reservamos parte del conjunto de entrenamiento como datos de *validación*.
- Definimos  $c'(w_1, w_2, w_3)$  como el número de veces que se observa el trigram  $(w_1, w_2, w_3)$  en el conjunto de validación.
- Elegimos  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  para maximizar:

$$L(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{w_1, w_2, w_3} c'(w_1, w_2, w_3) \log q(w_3|w_1, w_2)$$

sujetos a  $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$ , y  $\lambda_i \geq 0$  para todo  $i$ , donde

$$q(w_i|w_{i-2}, w_{i-1}) = \lambda_1 \cdot q_{\text{ML}}(w_i|w_{i-2}, w_{i-1}) + \lambda_2 \cdot q_{\text{ML}}(w_i|w_{i-1}) + \lambda_3 \cdot q_{\text{ML}}(w_i)$$

### 3.8. Métodos de Descuento

- Consideraremos los siguientes recuentos y estimaciones de máxima verosimilitud:
- Las estimaciones de máxima verosimilitud son altas, especialmente para los elementos con recuentos bajos.
- Definimos los recuentos "descontados" de la siguiente manera:

$$\text{Recuento}^*(x) = \text{Recuento}(x) - 0,5$$

- Las nuevas estimaciones se basan en los recuentos descontados.

Frase	Recuento	$q_{ML}(w_i w_{i-1})$
the	48	
the, dog	15	15/48
the, woman	11	11/48
the, man	10	10/48
the, park	5	5/48
the, job	2	2/48
the, telescope	1	1/48
the, manual	1	1/48
the, afternoon	1	1/48
the, country	1	1/48
the, street	1	1/48

Frase	Recuento	Recuento*(x)	$q_{ML}(w_i w_{i-1})$
the	48		
the, dog	15	14.5	14,5/48
the, woman	11	10.5	10,5/48
the, man	10	9.5	9,5/48
the, park	5	4.5	4,5/48
the, job	2	1.5	1,5/48
the, telescope	1	0.5	0,5/48
the, manual	1	0.5	0,5/48
the, afternoon	1	0.5	0,5/48
the, country	1	0.5	0,5/48
the, street	1	0.5	0,5/48

- Ahora tenemos cierta “masa de probabilidad faltante”:

$$\alpha(w_{i-1}) = 1 - \sum_w \frac{\text{Recuento}^*(w_{i-1}, w)}{\text{Recuento}(w_{i-1})}$$

Por ejemplo, en nuestro caso:

$$\alpha(\text{the}) = \frac{10 \times 0,5}{48} = \frac{5}{48}$$

### 3.8.1. Modelos de Katz Back-Off (Bigramas)

- Para un modelo de bigrama, definimos dos conjuntos:

$$A(w_{i-1}) = \{w : \text{Count}(w_{i-1}, w) > 0\}$$

$$B(w_{i-1}) = \{w : \text{Count}(w_{i-1}, w) = 0\}$$

- Un modelo de bigrama:

$$q_{BO}(w_i|w_{i-1}) = \begin{cases} \frac{\text{Count}^*(w_{i-1}, w_i)}{\text{Count}(w_{i-1})} & \text{si } w_i \in A(w_{i-1}) \\ \frac{\alpha(w_{i-1}) q_{ML}(w_i)}{\sum_{w \in B(w_{i-1})} q_{ML}(w)} & \text{si } w_i \in B(w_{i-1}) \end{cases}$$

- Donde:

$$\alpha(w_{i-1}) = 1 - \sum_{w \in A(w_{i-1})} \frac{\text{Count}^*(w_{i-1}, w)}{\text{Count}(w_{i-1})}$$

- Para un modelo de trigramas, primero definimos dos conjuntos:

$$A(w_{i-2}, w_{i-1}) = \{w : \text{Count}(w_{i-2}, w_{i-1}, w) > 0\}$$

$$B(w_{i-2}, w_{i-1}) = \{w : \text{Count}(w_{i-2}, w_{i-1}, w) = 0\}$$

- Un modelo de trigramas se define en términos del modelo de bigramas:

$$q_{\text{BO}}(w_i | w_{i-2}, w_{i-1}) = \begin{cases} \frac{\text{Count}^*(w_{i-2}, w_{i-1}, w_i)}{\text{Count}(w_{i-2}, w_{i-1})} & \text{si } w_i \in A(w_{i-2}, w_{i-1}) \\ \frac{\alpha(w_{i-2}, w_{i-1}) q_{\text{BO}}(w_i | w_{i-1})}{\sum_{w \in B(w_{i-2}, w_{i-1})} q_{\text{BO}}(w | w_{i-1})} & \text{si } w_i \in B(w_{i-2}, w_{i-1}) \end{cases}$$

- Donde:

$$\alpha(w_{i-2}, w_{i-1}) = 1 - \sum_{w \in A(w_{i-2}, w_{i-1})} \frac{\text{Count}^*(w_{i-2}, w_{i-1}, w)}{\text{Count}(w_{i-2}, w_{i-1})}$$

Los modelos de Katz Back-Off son una técnica utilizada en modelos de lenguaje para abordar el desafío de la escasez de datos. Estos modelos permiten estimar las probabilidades condicionales de palabras en función de contextos más pequeños cuando no hay suficientes datos disponibles para estimar directamente las probabilidades completas.

En un modelo de bigrama, se define el conjunto  $A(w_{i-1})$  como el conjunto de palabras  $w$  para las cuales la frecuencia de aparición de la secuencia  $(w_{i-1}, w)$  es mayor que cero, es decir,  $\text{Count}(w_{i-1}, w) > 0$ . Por otro lado, el conjunto  $B(w_{i-1})$  se define como el conjunto de palabras  $w$  para las cuales la frecuencia de aparición de la secuencia  $(w_{i-1}, w)$  es igual a cero, es decir,  $\text{Count}(w_{i-1}, w) = 0$ .

En un modelo de bigrama, la probabilidad condicional  $q_{\text{BO}}(w_i | w_{i-1})$  se calcula de la siguiente manera: si la palabra  $w_i$  está en el conjunto  $A(w_{i-1})$ , se utiliza una estimación basada en las frecuencias relativas de la secuencia  $(w_{i-1}, w_i)$  dividida por la frecuencia de  $w_{i-1}$ . Por otro lado, si  $w_i$  está en el conjunto  $B(w_{i-1})$ , se utiliza una estimación suavizada que combina una constante de suavizado  $\alpha(w_{i-1})$  y las probabilidades condicionales de máxima verosimilitud  $q_{\text{ML}}(w_i)$  de las palabras en el conjunto  $B(w_{i-1})$ .

La constante de suavizado  $\alpha(w_{i-1})$  se calcula restando la suma de las frecuencias relativas de las palabras en  $A(w_{i-1})$  de uno.

En el caso de un modelo de trigramas, se definen conjuntos similares  $A(w_{i-2}, w_{i-1})$  y  $B(w_{i-2}, w_{i-1})$  para las secuencias trigramas. La probabilidad condicional  $q_{\text{BO}}(w_i | w_{i-2}, w_{i-1})$  en un modelo de trigramas se calcula utilizando el modelo de bigrama correspondiente y aplicando la misma lógica de suavizado basado en los conjuntos  $A(w_{i-2}, w_{i-1})$  y  $B(w_{i-2}, w_{i-1})$ .

Estos modelos de Katz Back-Off permiten aproximar las probabilidades condicionales en situaciones donde la información disponible es limitada, al aprovechar información de contextos más pequeños cuando no se dispone de suficientes datos para estimaciones directas.

### 3.9. Resumen

- La derivación de probabilidades en modelos de lenguaje probabilísticos implica tres pasos:
  1. Expandir  $p(w_1, w_2, \dots, w_n)$  usando la regla de la Cadena.
  2. Aplicar las Asunciones de Independencia de Markov  
 $p(w_i|w_1, w_2, \dots, w_{i-2}, w_{i-1}) = p(w_i|w_{i-2}, w_{i-1})$ .
  3. Suavizar las estimaciones utilizando conteos de orden inferior.
- Otros métodos para mejorar los modelos de lenguaje incluyen:
  - Introducir variables latentes para representar temas, conocidos como modelos de temas. [Blei et al., 2003]
  - Reemplazar  $p(w_i|w_1, w_2, \dots, w_{i-2}, w_{i-1})$  con una red neuronal predictiva y una capa de embedding"para representar mejor contextos más grandes y aprovechar similitudes entre palabras en el contexto. [Bengio et al., 2000]
- Los modelos de lenguaje modernos utilizan redes neuronales profundas en su estructura principal y tienen un vasto espacio de parámetros.



## Capítulo 4

# Text Classification and Naïve Bayes

- La clasificación es fundamental tanto para la inteligencia humana como para la artificial.
- Decidir qué letra, palabra o imagen se ha presentado a nuestros sentidos, reconocer caras o voces, clasificar el correo, asignar calificaciones a las tareas.
- Estos son ejemplos de asignar una categoría a una entrada.
- El objetivo de la clasificación es tomar una única observación, extraer algunas características útiles y así clasificar la observación en una de las clases discretas establecidas.
- La mayoría de los casos de clasificación en el procesamiento del lenguaje se realizan mediante aprendizaje automático supervisado.
- Estas diapositivas se basan en el material del curso de Daniel Jurafsky: <https://web.stanford.edu/~jurafsky/slp3/4.pdf>

Ejemplo 1: Clasificación de spam

Ejemplo 2: ¿Quién escribió los documentos Federalist?

- 1787-8: Ensayos anónimos intentaron convencer a Nueva York de ratificar la Constitución de EE. UU.: Jay, Madison, Hamilton.
- La autoría de 12 de las cartas está en disputa.
- 1963: Resuelto por Mosteller y Wallace mediante métodos bayesianos.

**Subject:** Important notice!  
**From:** Stanford University <newsforum@stanford.edu>  
**Date:** October 28, 2011 12:34:16 PM PDT  
**To:** undisclosed-recipients:;

Greats News!

You can now access the latest news by using the link below to login to Stanford University News Forum.

<http://www.123contactform.com/contact-form-StanfordNew1-236335.html>

Click on the above link to login for more information about this new exciting forum. You can also copy the above link to your browser bar and login for more information about the new services.

© Stanford University. All Rights Reserved.

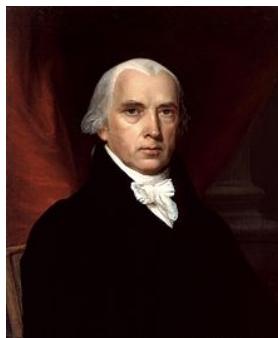


Figura 4.1: James Madison

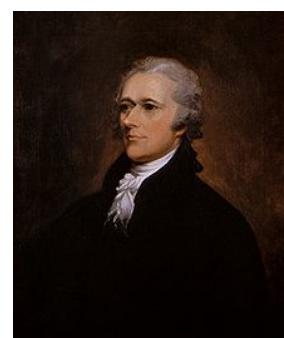


Figura 4.2: Alexander Hamilton

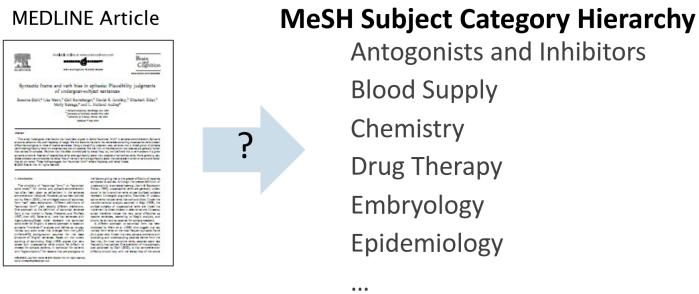
Ejemplo 3: ¿Cuál es el tema de este artículo médico?

Ejemplo 4: ¿Reseña de película positiva o negativa?

- + ...personajes extravagantes y sátira **rico** aplicada, y algunos **grandes** giros de la trama.
- - Fue **patético**. La peor parte fue las escenas de boxeo...
- + ...salsa de caramelo **increíble** y almendras dulces y tostadas. ¡Me **encanta** este lugar!
- - ...pizza **horrible** y **ridículamente** cara...

### ¿Por qué el análisis de sentimientos?

- Película: ¿Esta reseña es positiva o negativa?
- Productos: ¿Qué opinan las personas sobre el nuevo iPhone?
- Sentimiento público: ¿Cómo está la confianza del consumidor?



- Política: ¿Qué opinan las personas sobre este candidato o tema?
- Predicción: Predecir resultados electorales o tendencias del mercado a partir del sentimiento.

**Clasificación básica de sentimientos** El análisis de sentimientos es la detección de actitudes.

- Tarea simple en la que nos enfocamos en esta clase.
  - ¿Es la actitud de este texto positiva o negativa?

**Resumen: Clasificación de texto** La clasificación de texto se puede aplicar a varias tareas, incluyendo:

- Análisis de sentimientos
- Detección de spam
- Identificación de autoría
- Identificación de idioma
- Asignación de categorías, temas o géneros
- ...

## 4.1. Clasificación de texto: Definición

**Entrada:**

- Un documento  $d$
- Un conjunto fijo de clases  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_J\}$

**Salida:** Una clase predicha  $c \in C$

#### 4.1.1. Métodos de clasificación: Reglas codificadas a mano

Reglas basadas en combinaciones de palabras u otras características.

- Spam: dirección-en-lista-negra O (“dólares” Y “has sido seleccionado”)
- La precisión puede ser alta si las reglas se refinan cuidadosamente por expertos
- Pero construir y mantener estas reglas es costoso

#### 4.1.2. Métodos de clasificación: Aprendizaje automático supervisado

**Entrada:**

- Un documento  $d$
- Un conjunto fijo de clases  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_J\}$
- Un conjunto de entrenamiento de  $m$  documentos etiquetados manualmente:  $(d_1, c_1), (d_2, c_2), \dots, (d_m, c_m)$

**Salida:**

- Un clasificador aprendido  $\gamma : d \rightarrow c$

Cualquier tipo de clasificador se puede utilizar:

- Naïve Bayes
- Regresión logística
- Redes neuronales
- k-vecinos más cercanos

#### 4.1.3. Problemas de aprendizaje supervisado

- Tenemos ejemplos de entrenamiento  $x^{(i)}, y^{(i)}$  para  $i = 1, \dots, m$ . Cada  $x^{(i)}$  es una entrada, cada  $y^{(i)}$  es una etiqueta.
- La tarea es aprender una función  $f$  que asigna las entradas  $x$  a las etiquetas  $f(x)$ .
- Modelos condicionales:
  - Aprender una distribución  $p(y|x)$  a partir de ejemplos de entrenamiento.
  - Para cualquier entrada de prueba  $x$ , definir  $f(x) = \arg \max_y p(y|x)$ .

#### 4.1.4. Modelos generativos

- Dados ejemplos de entrenamiento  $x^{(i)}, y^{(i)}$  para  $i = 1, \dots, m$ , la tarea es aprender una función  $f$  que asigna las entradas  $x$  a las etiquetas  $f(x)$ .
- Modelos generativos:
  - Aprender la distribución conjunta  $p(x, y)$  a partir de los ejemplos de entrenamiento.
  - A menudo, tenemos  $p(x, y) = p(y)p(x|y)$ .
  - Nota: Luego tenemos

$$p(y|x) = \frac{p(y)p(x|y)}{p(x)} \quad \text{donde} \quad p(x) = \sum_y p(y)p(x|y).$$

#### 4.1.5. Clasificación con Modelos Generativos

- Dados ejemplos de entrenamiento  $x^{(i)}, y^{(i)}$  para  $i = 1, \dots, m$ . La tarea consiste en aprender una función  $f$  que mapee las entradas  $x$  a las etiquetas  $f(x)$ .
- Modelos generativos:
  - Aprenden la distribución conjunta  $p(x, y)$  a partir de los ejemplos de entrenamiento.
  - A menudo, tenemos  $p(x, y) = p(y)p(x|y)$ .
- La salida del modelo es:

$$\begin{aligned} f(x) &= \arg \max_y p(y|x) = \arg \max_y \frac{p(y)p(x|y)}{p(x)} \\ &= \arg \max_y p(y)p(x|y) \end{aligned}$$

## 4.2. Intuición del Bayes Ingenuo

El Bayes Ingenuo es un método de clasificación simple ("ingenuo") basado en la regla de Bayes.

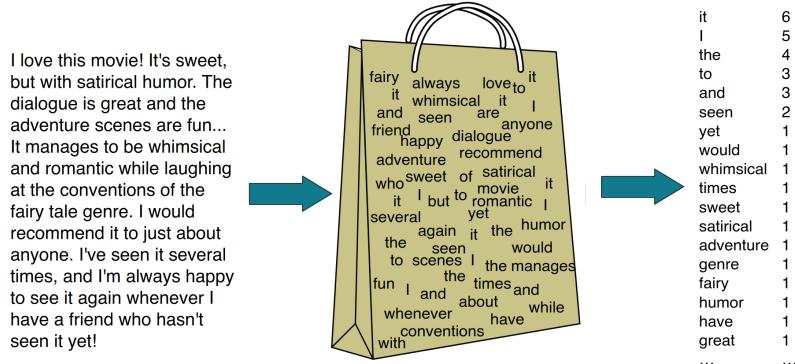
- Se basa en una representación muy simple de un documento: *Bolsa de palabras*.

### La Representación de Bolsa de Palabras

#### 4.2.1. Aplicación de la Regla de Bayes a Documentos y Clases

Para un documento  $d$  y una clase  $c$ :

$$P(c|d) = \frac{P(d|c)P(c)}{P(d)}$$



### 4.3. Clasificador Bayes Ingenuo

- MAP significa “máximo a posteriori”, que representa la clase más probable:

$$c_{\text{MAP}} = \arg \max_{c \in C} P(c|d)$$

- Para calcular la clase más probable, aplicamos la regla de Bayes:

$$= \arg \max_{c \in C} \frac{P(d|c)P(c)}{P(d)}$$

- Finalmente, podemos eliminar el denominador ya que permanece constante para todas las clases:

$$= \arg \max_{c \in C} P(d|c)P(c)$$

- Para clasificar el documento  $d$ , usamos la estimación MAP:

$$c_{\text{MAP}} = \arg \max_{c \in C} P(d|c)P(c)$$

- El documento  $d$  se representa como un conjunto de características  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .
- El clasificador calcula la probabilidad condicional de las características dada una clase y la probabilidad a priori de la clase:

$$= \arg \max_{c \in C} P(x_1, x_2, \dots, x_n|c)P(c)$$

- El término  $P(x_1, x_2, \dots, x_n|c)$  representa la "verosimilitud" de las características dada la clase.
- El término  $P(c)$  representa la probabilidad .º priori" de la clase.

- El clasificador Bayes Ingenuo [McCallum et al., 1998] calcula la estimación MAP considerando las probabilidades de verosimilitud y a priori:

$$c_{\text{MAP}} = \arg \max_{c \in C} P(x_1, x_2, \dots, x_n | c) P(c)$$

- La probabilidad de las características dada la clase,  $P(x_1, x_2, \dots, x_n | c)$ , puede estimarse contando las frecuencias relativas en un corpus.
- La probabilidad a priori de la clase,  $P(c)$ , representa con qué frecuencia ocurre esta clase.
- Sin algunas suposiciones simplificadoras, estimar la probabilidad de cada posible combinación de características en  $P(x_1, x_2, \dots, x_n | c)$  requeriría un gran número de parámetros y conjuntos de entrenamiento imposiblemente grandes.
- Por lo tanto, los clasificadores Bayes Ingenuo realizan dos suposiciones simplificadoras.

#### 4.3.1. Suposiciones de Independencia del Bayes Ingenuo Multinomial

- Suposición de Bolsa de Palabras: asumimos que la posición de las palabras en el documento no importa.
- Suposición de Independencia Condicional: asumimos que las probabilidades de las características  $P(x_i | c_j)$  son independientes dada la clase  $c_j$ .
- En el clasificador Bayes Ingenuo Multinomial, la probabilidad de un documento con características  $x_1, x_2, \dots, x_n$  dada la clase  $c$  se puede calcular como:

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n | c) = P(x_1 | c) \cdot P(x_2 | c) \cdot P(x_3 | c) \cdot \dots \cdot P(x_n | c)$$

#### 4.3.2. Clasificador Bayes Ingenuo Multinomial

- La estimación del Máximo A Posteriori (MAP) para la clase  $c$  en el clasificador Bayes Ingenuo Multinomial se calcula como:

$$c_{\text{MAP}} = \arg \max_{c \in C} P(x_1, x_2, \dots, x_n | c) P(c)$$

- Alternativamente, podemos escribirlo como:

$$c_{\text{NB}} = \arg \max_{c \in C} P(c_j) \prod_{x \in X} P(x | c)$$

- $P(c_j)$  representa la probabilidad a priori de la clase  $c_j$ .
- $\prod_{x \in X} P(x | c)$  representa la verosimilitud de las características  $x_1, x_2, \dots, x_n$  dadas la clase  $c$ .

### 4.3.3. Aplicación de los clasificadores Naive Bayes multinomiales a la clasificación de texto

El clasificador Naive Bayes multinomial para la clasificación de texto se puede aplicar de la siguiente manera:

$$c_{\text{NB}} = \arg \max_{c_j \in C} P(c_j) \prod_{i \in \text{positions}} P(x_i | c_j)$$

Donde:

- $c_{\text{NB}}$  representa la clase predicha para el documento de prueba.
- $C$  es el conjunto de todas las clases posibles.
- $P(c_j)$  es la probabilidad previa de la clase  $c_j$ .
- $\prod_{i \in \text{positions}} P(x_i | c_j)$  calcula la probabilidad de cada característica  $x_i$  en la posición  $i$  dada la clase  $c_j$ .
- El producto se toma sobre todas las posiciones de palabras en el documento de prueba.

### 4.3.4. Problemas al multiplicar muchas probabilidades

Multiplicar muchas probabilidades puede resultar en un desbordamiento de punto flotante, especialmente cuando se manejan probabilidades pequeñas. Por ejemplo,  $0,0006 \times 0,0007 \times 0,0009 \times 0,01 \times 0,5 \times 0,000008 \dots$

Para solucionar este problema, podemos utilizar logaritmos, ya que  $\log(ab) = \log(a) + \log(b)$ . En lugar de multiplicar las probabilidades, podemos sumar los logaritmos de las probabilidades. Así, el clasificador Naive Bayes multinomial se puede expresar utilizando logaritmos de la siguiente manera:

$$c_{\text{NB}} = \arg \max_{c_j \in C} \left( \log(P(c_j)) + \sum_{i \in \text{position}} \log(P(x_i | c_j)) \right)$$

Al tomar logaritmos, evitamos el problema del desbordamiento de punto flotante y realizamos cálculos en el espacio logarítmico. El clasificador se convierte en un modelo lineal, donde la predicción es el argmax de la suma de pesos (logaritmos de probabilidades) y las entradas (logaritmos de probabilidades condicionales). Por lo tanto, Naive Bayes es un clasificador lineal que opera en el espacio logarítmico.

### 4.3.5. Aprendizaje del modelo Naive Bayes multinomial

El primer intento: Estimaciones de máxima verosimilitud

- Las probabilidades se estiman utilizando las frecuencias observadas en los datos de entrenamiento.
- La probabilidad previa de una clase  $c_j$  se estima como:

$$\hat{P}(c_j) = \frac{N_{c_j}}{N_{\text{total}}}$$

donde  $N_{c_j}$  es el número de documentos en la clase  $c_j$  y  $N_{\text{total}}$  es el número total de documentos.

- La estimación de la probabilidad de la palabra  $w_i$  dada la clase  $c_j$  se calcula como:

$$\hat{P}(w_i|c_j) = \frac{\text{count}(w_i, c_j)}{\sum_{w \in V} \text{count}(w, c_j)}$$

donde  $w \in V$  representa una palabra en el vocabulario  $V$ .

- El denominador es la suma de las frecuencias de todas las palabras en el vocabulario dentro de la clase  $c_j$ .

#### 4.3.6. Estimación de parámetros

Para estimar los parámetros del modelo Naive Bayes multinomial, seguimos estos pasos:

- Creamos un mega-documento para cada tema  $c_j$  concatenando todos los documentos de ese tema.
- Calculamos la frecuencia de la palabra  $w_i$  en el mega-documento, que representa la fracción de veces que la palabra  $w_i$  aparece entre todas las palabras en los documentos del tema  $c_j$ .
- La probabilidad estimada  $\hat{P}(w_i|c_j)$  de la palabra  $w_i$  dada la clase  $c_j$  se obtiene dividiendo el recuento de ocurrencias de  $w_i$  en el mega-documento del tema  $c_j$  por el recuento total de palabras en el mega-documento:

$$\hat{P}(w_i|c_j) = \frac{\text{count}(w_i, c_j)}{\sum_{w \in V} \text{count}(w, c_j)}$$

Aquí,  $\text{count}(w_i, c_j)$  representa el número de veces que la palabra  $w_i$  aparece en el mega-documento del tema  $c_j$ , y  $\text{count}(w, c_j)$  es el recuento total de palabras en el mega-documento.

#### 4.3.7. Probabilidades cero y el problema de las palabras no vistas

Consideremos el escenario en el que no hemos encontrado la palabra "fantástico.<sup>en</sup>" ningún documento de entrenamiento clasificado como positivo (pulgar hacia arriba). Utilizando la estimación de máxima verosimilitud, la probabilidad

$\hat{P}(\text{"fantástico"} \mid \text{positivo})$  se calcularía como:

$$\hat{P}(\text{"fantástico"} \mid \text{positivo}) = \frac{\text{count}(\text{"fantástico"}, \text{positivo})}{\sum_{w \in V} \text{count}(w, \text{positivo})}$$

En este caso, el recuento de la palabra “fantástico” en los documentos positivos es cero, lo que conduce a una probabilidad cero:

$$\hat{P}(\text{"fantástico"} \mid \text{positivo}) = \frac{0}{\sum_{w \in V} \text{count}(w, \text{positivo})} = 0$$

Sin embargo, las probabilidades cero no pueden eliminarse, independientemente de la evidencia adicional presente. Esto plantea un problema al calcular la estimación del máximo a posteriori (MAP), que se utiliza para la clasificación:

$$c_{\text{MAP}} = \arg \max_c \left( \hat{P}(c) \prod_i \hat{P}(x_i \mid c) \right)$$

Con una probabilidad cero para una palabra, toda la expresión se vuelve cero, independientemente de la otra evidencia.

#### 4.3.8. Suavizado Laplaciano (Add-1) para Naïve Bayes

Manejo de probabilidades cero con el suavizado Laplaciano (Add-1):

- Para abordar el problema de las probabilidades cero, podemos utilizar la técnica de suavizado Laplaciano (Add-1).
- La estimación suavizada  $\hat{P}(w_i \mid c)$  se calcula como:

$$\hat{P}(w_i \mid c) = \frac{\text{count}(w_i, c) + 1}{\sum_{w \in V} (\text{count}(w, c) + 1)}$$

- Aquí, se agrega un recuento adicional de 1 tanto al numerador como al denominador.
- El denominador se ajusta agregando el tamaño del vocabulario  $V$  para garantizar una normalización adecuada.
- Al hacerlo, evitamos las probabilidades cero y permitimos que cierta masa de probabilidad se distribuya a palabras no vistas.
- Esta técnica de suavizado ayuda a mitigar el problema de las palabras no vistas y evita la eliminación completa de ciertas clases durante la clasificación.

#### 4.3.9. Naïve Bayes multinomial: aprendizaje

Aprendiendo el modelo Naïve Bayes multinomial:

- Para aprender los parámetros del modelo, necesitamos calcular los términos  $P(c_j)$  y  $P(w_k | c_j)$ .
- Para cada clase  $c_j$  en el conjunto de clases  $C$ , realizamos los siguientes pasos:

- Recuperamos todos los documentos  $docs_j$  que pertenecen a la clase  $c_j$ .
- Calculamos el término  $P(w_k | c_j)$  para cada palabra  $w_k$  en el vocabulario  $V$ :

$$P(w_k | c_j) = \frac{n_k + \alpha}{n + \alpha \cdot |Vocabulary|}$$

donde  $n_k$  representa el número de ocurrencias de la palabra  $w_k$  en el documento concatenado  $Text_j$ .

- Calculamos la probabilidad a priori  $P(c_j)$ :

$$P(c_j) = \frac{|docs_j|}{\text{total number of documents}}$$

- Para calcular  $P(w_k | c_j)$ , necesitamos extraer el vocabulario  $V$  del corpus de entrenamiento.

#### 4.3.10. Palabras desconocidas

Tratamiento de palabras desconocidas en los datos de prueba:

- Cuando encontramos palabras desconocidas en los datos de prueba que no aparecen en los datos de entrenamiento o en el vocabulario, las ignoramos.
- Eliminamos estas palabras desconocidas del documento de prueba como si no estuvieran presentes en absoluto.
- No asignamos ninguna probabilidad a estas palabras desconocidas en el proceso de clasificación.

Esto es una visión general del modelo Naive Bayes multinomial y su aplicación a la clasificación de texto. Cabe destacar que existen variantes y extensiones más sofisticadas de Naive Bayes que se adaptan a diferentes requisitos y características de los datos.

### 4.4. Ejemplo

Datos de Entrenamiento:

Test:

Categoría	Texto
Negative	Just plain boring, entirely predictable and lacks energy.
Negative	No surprises and very few laughs.
Positive	Very powerful.
Positive	The most fun film of the summer.

Categoría	Texto
?	Predictable with no fun.

## 4.5. Naive Bayes como modelo de lenguaje

Cuando utilizamos características de palabras individuales y consideramos todas las palabras en el texto, el naive Bayes tiene una similitud importante con la modelización del lenguaje.

Específicamente, un modelo naive Bayes se puede ver como un conjunto de modelos de lenguaje de unigramas específicos de cada clase, en el que el modelo para cada clase instancia un modelo de lenguaje de unígrafo.

Las características de verosimilitud del modelo naive Bayes asignan una probabilidad a cada palabra  $P(\text{word}|c)$ , y el modelo también asigna una probabilidad a cada oración:

$$P(s|c) = \prod_{i \in \text{positions}} P(w_i|c)$$

Consideremos un modelo naive Bayes con las clases positiva (+) y negativa (-) y los siguientes parámetros del modelo:

w	$P(w +)$	$P(w -)$
I	0.1	0.2
love	0.1	0.001
this	0.01	0.01
fun	0.05	0.005
film	0.1	0.1
...	...	...

Cada una de las dos columnas anteriores instancian un modelo de lenguaje que puede asignar una probabilidad a la oración "I love this fun film":

$$P("I \text{ love this fun film"} | +) = 0.1 \times 0.1 \times 0.01 \times 0.05 \times 0.1 = 0.0000005$$

$$P("I \text{ love this fun film"} | -) = 0.2 \times 0.001 \times 0.01 \times 0.005 \times 0.1 = 0.000000010$$

Como sucede, el modelo positivo asigna una probabilidad más alta a la oración:

$$P(s|\text{pos}) > P(s|\text{neg})$$

	Cat	Documents
Training	-	just plain boring entirely predictable and lacks energy no surprises and very few laughs very powerful the most fun film of the summer
Test	?	predictable <del>with</del> no fun

### 1. Prior from training:

$$\hat{P}(c_j) = \frac{N_{c_j}}{N_{total}} \quad P(-) = 3/5 \quad P(+) = 2/5$$

### 2. Drop "with"

### 3. Likelihoods from training:

$$p(w_i|c) = \frac{\text{count}(w_i, c) + 1}{(\sum_{w \in V} \text{count}(w, c)) + |V|}$$

$$P(\text{"predictable"}|-) = \frac{1+1}{14+20} \quad P(\text{"predictable"}|+) = \frac{0+1}{9+20}$$

$$P(\text{"no"}|-) = \frac{1+1}{14+20} \quad P(\text{"no"}|+) = \frac{0+1}{9+20}$$

$$P(\text{"fun"}|-) = \frac{0+1}{14+20} \quad P(\text{"fun"}|+) = \frac{1+1}{9+20}$$

### 4. Scoring the test set:

$$P(-)P(S|-) = \frac{3}{5} \times \frac{2 \times 2 \times 1}{34^3} = 6.1 \times 10^{-5}$$

$$P(+)P(S|+) = \frac{2}{5} \times \frac{1 \times 1 \times 2}{29^3} = 3.2 \times 10^{-5}$$

Cabe destacar que esto es solo la parte de verosimilitud del modelo naïve Bayes; una vez que multiplicamos por la probabilidad a priori, un modelo naïve Bayes completo podría tomar una decisión de clasificación diferente.

## 4.6. Evaluación

- Consideremos solo tareas de clasificación de texto binario.
- Imagina que eres el CEO de Delicious Pie Company.
- Quieres saber lo que la gente está diciendo sobre tus pasteles.
- Por lo tanto, construyes un detector de tweets de "Delicious Pie" con las siguientes clases:
  - Clase positiva: tweets sobre Delicious Pie Co.
  - Clase negativa: todos los demás tweets.

### 4.6.1. La Matriz de Confusión 2x2

	Sistema Positivo	Sistema Negativo
Oro Positivo	Verdadero Positivo (VP)	Falso Negativo (FN)
Oro Negativo	Falso Positivo (FP)	Verdadero Negativo (VN)

**Recall** (también conocido como **Sensibilidad** o **Tasa de Verdaderos Positivos**):

$$\text{Recall} = \frac{VP}{VP + FN}$$

**Precisión:**

$$\text{Precisión} = \frac{VP}{VP + FP}$$

**Exactitud:**

$$\text{Exactitud} = \frac{VP + VN}{VP + FP + VN + FN}$$

#### 4.6.2. Evaluación: Exactitud

¿Por qué no usamos la exactitud como nuestra métrica?  
Imagina que vimos 1 millón de tweets:

- 100 de ellos hablaban sobre Delicious Pie Co.
- 999,900 hablaban de otra cosa.

Podríamos construir un clasificador tonto que simplemente etiquete todos los tweets como "no sobre pasteles":

- ¡¡¡Obtendría una exactitud del 99.99 %!!! ¡¡¡Wow!!!
- ¡Pero sería inútil! ¡No devuelve los comentarios que estamos buscando!

Por eso usamos precisión y recall en su lugar.

#### 4.6.3. Evaluación: Precisión y Recall

**Precisión** mide el porcentaje de elementos que el sistema detectó (es decir, los elementos que el sistema etiquetó como positivos) que son realmente positivos (según las etiquetas de oro humanas).

$$\text{Precisión} = \frac{\text{Verdaderos Positivos}}{\text{Verdaderos Positivos} + \text{Falsos Positivos}}$$

**Recall** mide el porcentaje de elementos que el sistema identificó correctamente de todos los elementos que deberían haber sido identificados.

$$\text{Recall} = \frac{\text{Verdaderos Positivos}}{\text{Verdaderos Positivos} + \text{Falsos Negativos}}$$

#### 4.6.4. ¿Por qué Precisión y Recall?

Considera nuestro clasificador tonto de pasteles que simplemente etiqueta nada como "sobre pasteles".

- Exactitud = 99.99 % (etiqueta correctamente la mayoría de los tweets como no relacionados con pasteles)
- Recall = 0 (no detecta ninguno de los 100 tweets relacionados con pasteles)

La precisión y el recall, a diferencia de la exactitud, enfatizan los verdaderos positivos:

- Se centran en encontrar las cosas que se supone que debemos buscar.

#### 4.6.5. Una Medida Combinada: Medida F

La medida F es un número único que combina la precisión (P) y el recall (R), definida como:

$$F_\beta = \frac{(\beta^2 + 1)PR}{\beta^2 P + R}$$

La medida F, definida con el parámetro  $\beta$ , pondera diferencialmente la importancia del recall y la precisión.

- $\beta > 1$  favorece al recall
- $\beta < 1$  favorece a la precisión

Cuando  $\beta = 1$ , la precisión y el recall son iguales, y tenemos la medida  $F_1$  equilibrada:

$$F_1 = \frac{2PR}{P + R}$$

#### 4.6.6. Conjuntos de Prueba de Desarrollo ("Devsets")

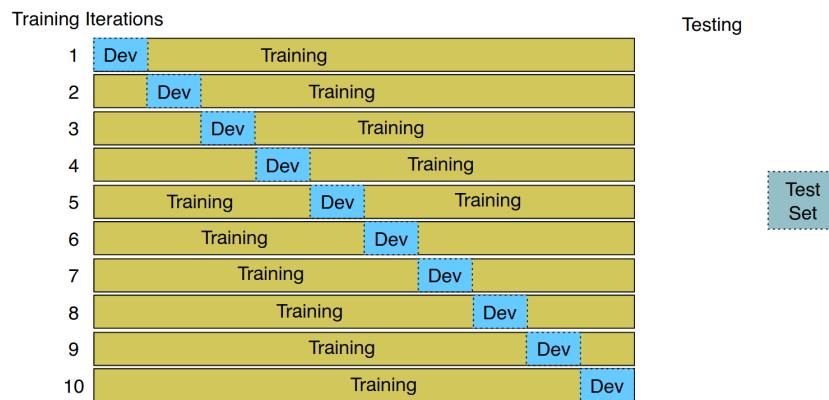
- Para evitar el sobreajuste y proporcionar una estimación más conservadora del rendimiento, comúnmente utilizamos un enfoque de tres conjuntos: conjunto de entrenamiento, conjunto de desarrollo y conjunto de prueba.



- **Conjunto de entrenamiento:** Se utiliza para entrenar el modelo.
- **Conjunto de desarrollo:** Se utiliza para ajustar el modelo y seleccionar los mejores hiperparámetros.
- **Conjunto de prueba:** Se utiliza para informar el rendimiento final del modelo.
- Este enfoque garantiza que el modelo no esté ajustado específicamente al conjunto de prueba, evitando el sobreajuste.
- Sin embargo, crea una paradoja: queremos la mayor cantidad de datos posible para el entrenamiento, pero también para el conjunto de desarrollo.
- ¿Cómo dividimos los datos?

#### 4.6.7. Validación Cruzada: Múltiples Divisiones

- La validación cruzada nos permite utilizar todos nuestros datos para el entrenamiento y la prueba sin tener un conjunto de entrenamiento, conjunto de desarrollo y conjunto de prueba fijos.
- Elegimos un número  $k$  y dividimos nuestros datos en  $k$  subconjuntos disjuntos llamados pliegues.
- En cada iteración, uno de los pliegues se selecciona como conjunto de prueba mientras que los  $k - 1$  pliegues restantes se utilizan para entrenar el clasificador.
- Calculamos la tasa de error en el conjunto de prueba y repetimos este proceso  $k$  veces.
- Finalmente, promediamos las tasas de error de estas  $k$  ejecuciones para obtener una tasa de error promedio.
- Por ejemplo, la validación cruzada de 10 pliegues implica entrenar 10 modelos con el 90 % de los datos y probar cada modelo por separado.
- Las tasas de error resultantes se promedian para obtener la estimación final del rendimiento.
- Sin embargo, la validación cruzada requiere que todo el corpus sea ciego, lo que impide examinar los datos para sugerir características o comprender el comportamiento del sistema.
- Para abordar esto, se crea un conjunto de entrenamiento y un conjunto de prueba fijos, y se realiza la validación cruzada de 10 pliegues dentro del conjunto de entrenamiento.
- La tasa de error se calcula convencionalmente en el conjunto de prueba.



#### 4.6.8. Matriz de Confusión para clasificación de 3 clases

		gold labels			
		urgent	normal	spam	
system output	urgent	8	10	1	$\text{precision}_u = \frac{8}{8+10+1}$
	normal	5	60	50	$\text{precision}_n = \frac{60}{5+60+50}$
	spam	3	30	200	$\text{precision}_s = \frac{200}{3+30+200}$
		$\text{recall}_u = \frac{8}{8+5+3}$	$\text{recall}_n = \frac{60}{10+60+30}$	$\text{recall}_s = \frac{200}{1+50+200}$	

Cómo combinar métricas binarias (Precisión, Recall,  $F_1$ ) de más de 2 clases para obtener una métrica única:

- Macro-promedio:

- Calcular las métricas de rendimiento (Precisión, Recall,  $F_1$ ) para cada clase individualmente.
- Promediar las métricas en todas las clases.

- Micro-promedio:

- Recopilar las decisiones para todas las clases en una matriz de confusión.
- Calcular la Precisión y el Recall a partir de la matriz de confusión.

Class 1: Urgent		Class 2: Normal		Class 3: Spam		Pooled		
true	true	true	true	true	true	true	true	
urgent	not	normal	not	spam	not	yes	no	
system	8	11	system	60	55	system	200	33
urgent	8	340	normal	40	212	spam	51	83
system	8	340	not	40	212	not	51	83
yes	268	99	no	99	635	yes	268	99
no	99	635	yes	99	635	no	99	635

$$\text{precision} = \frac{8}{8+11} = .42 \quad \text{precision} = \frac{60}{60+55} = .52 \quad \text{precision} = \frac{200}{200+33} = .86 \quad \text{microaverage precision} = \frac{268}{268+99} = .73$$

$$\text{macroaverage precision} = \frac{.42+.52+.86}{3} = .60$$



# Capítulo 5

## Modelos Lineales

### 5.1. Aprendizaje Supervisado

La esencia del aprendizaje automático supervisado es la creación de mecanismos que puedan examinar ejemplos y producir generalizaciones [Goldberg, 2017]. Diseñamos un algoritmo cuya entrada es un conjunto de ejemplos etiquetados y cuya salida es una función (o un programa) que recibe una instancia y produce la etiqueta deseada. Por ejemplo, si la tarea es distinguir entre correos electrónicos de spam y no spam, los ejemplos etiquetados serían correos electrónicos etiquetados como spam y correos electrónicos etiquetados como no spam. Se espera que la función resultante produzca predicciones de etiquetas correctas también para instancias que no ha visto durante el entrenamiento. Este enfoque difiere de diseñar un algoritmo para realizar la tarea (por ejemplo, sistemas basados en reglas diseñados manualmente).

#### 5.1.1. Funciones Parametrizadas

Buscar en el conjunto de todas las posibles funciones es un problema muy difícil (y bastante mal definido) [Goldberg, 2017]. A menudo nos limitamos a buscar dentro de familias específicas de funciones. Por ejemplo, el espacio de todas las funciones lineales con  $d_{in}$  entradas y  $d_{out}$  salidas. Estas familias de funciones se llaman clases de hipótesis. Al restringirnos a una clase de hipótesis específica, estamos inyectando al aprendiz con sesgo inductivo, es decir, un conjunto de suposiciones sobre la forma de la solución deseada. Algunas clases de hipótesis facilitan procedimientos eficientes para buscar la solución.

### 5.2. Modelos Lineales

Una clase de hipótesis común es la de una función lineal de alta dimensión:

$$f(\vec{x}) = \vec{x} \cdot W + \vec{b} \quad (5.1)$$

$$\vec{x} \in \mathcal{R}^{d_{in}} \quad W \in \mathcal{R}^{d_{in} \times d_{out}} \quad \vec{b} \in \mathcal{R}^{d_{out}}$$

El vector  $\vec{x}$  es la entrada de la función. La matriz  $W$  y el vector  $\vec{b}$  son los parámetros. El objetivo del aprendizaje es establecer los valores de los parámetros  $W$  y  $\vec{b}$  de manera que la función se comporte como se pretende en una colección de valores de entrada  $\vec{x}_{1:k} = \vec{x}_1, \dots, \vec{x}_k$  y las correspondientes salidas deseadas  $\vec{y}_{1:k} = \vec{y}_1, \dots, \vec{y}_k$ . La tarea de buscar en el espacio de funciones se reduce así a buscar en el espacio de parámetros.

### 5.2.1. Ejemplo: Detección de Idiomas

Consideremos la tarea de distinguir entre documentos escritos en inglés y documentos escritos en alemán. Este es un problema de clasificación binaria:

$$f(\vec{x}) = \vec{x} \cdot \vec{w} + b \quad (5.2)$$

donde  $d_{out} = 1$ , donde  $\vec{w}$  es un vector y  $b$  es un escalar. El rango de la función lineal es  $[-\infty, \infty]$ . Para usarla en la clasificación binaria, es común pasar la salida de  $f(x)$  a través de la función *signo*, mapeando los valores negativos a -1 (clase negativa) y los valores no negativos a +1 (clase positiva).

Las frecuencias de letras son buenos predictores (características) para esta tarea, pero aún más informativos son los recuentos de bigramas de letras, es decir, pares de letras consecutivas. Es probable que nos encontramos con un documento nuevo sin ninguna de las palabras que observamos en el conjunto de entrenamiento, mientras que un documento sin ninguno de los distintivos bigramas de letras es significativamente menos probable [Goldberg, 2017]. Supongamos que tenemos un alfabeto de 28 letras (a-z, espacio y un símbolo especial para todos los demás caracteres, incluidos dígitos, puntuación, etc.). Los documentos se representan como vectores de dimensión  $28 \times 28$ , es decir,  $\vec{x} \in \mathcal{R}^{784}$ . Cada entrada  $\vec{x}_{[i]}$  representa un recuento de una combinación particular de letras en el documento, normalizado por la longitud del documento. Por ejemplo, si denotamos por  $\vec{x}_{ab}$  la entrada de  $\vec{x}$  correspondiente al bigrama de letras  $ab$ :

$$\vec{x}_{ab} = \frac{\#ab}{|D|} \quad (5.3)$$

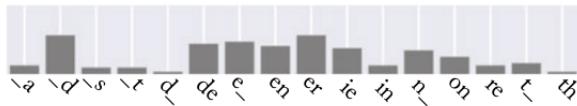
donde  $\#ab$  es el número de veces que aparece el bigrama  $ab$  en el documento y  $|D|$  es el número total de bigramas en el documento (la longitud del documento).

La figura muestra histogramas de bigramas de caracteres para documentos en inglés y alemán. Los guiones bajos representan espacios. Solo se muestran los bigramas de caracteres más frecuentes.



Fuente: [Goldberg, 2017]

La figura anterior muestra patrones claros en los datos. Dado un nuevo elemento, por ejemplo:



Probablemente podríamos decir que es más similar al grupo alemán que al grupo inglés (observar la frecuencia de "thz ie"). No podemos usar una regla única definitiva como "si tiene th es inglés." o "si tiene ie es alemán". Aunque los textos en alemán tienen considerablemente menos "th" que el inglés, la combinación "th" puede ocurrir en textos en alemán, al igual que la combinación "ie" puede ocurrir en inglés. La decisión requiere ponderar diferentes factores relativos entre sí.

Podemos formalizar el problema en un entorno de aprendizaje automático utilizando un modelo lineal:

$$\hat{y} = \text{sign}(\vec{x} \cdot \vec{w} + b) = \text{sign}(\vec{x}_{aa} \times \vec{w}_{aa} + \vec{x}_{ab} \times \vec{w}_{ab} + \vec{x}_{ac} \times \vec{w}_{ac} \cdots + b) \quad (5.4)$$

Un documento se considerará inglés si  $f(\vec{x}) \geq 0$  y alemán en caso contrario. La intuición detrás del aprendizaje es la siguiente:

1. El aprendizaje debe asignar valores positivos grandes a las entradas de  $\vec{w}$  asociadas con pares de letras que son mucho más comunes en inglés que en alemán (por ejemplo, "th").
2. También debe asignar valores negativos a los pares de letras que son mucho más comunes en alemán que en inglés (por ejemplo, "ie", ".en").

- Finalmente, debe asignar valores alrededor de cero a los pares de letras que son comunes o raros en ambos idiomas.

### 5.3. Clasificación binaria log-lineal

La salida  $f(\vec{x})$  se encuentra en el rango  $[-\infty, \infty]$ , y la mapeamos a una de las dos clases  $\{-1, +1\}$  utilizando la función *signo*. Esto es adecuado si lo único que nos importa es la clase asignada. Sin embargo, puede que también estemos interesados en la confianza de la decisión o en la probabilidad que el clasificador asigna a la clase.

Una alternativa que facilita esto es mapear la salida al rango  $[0, 1]$  mediante una función de compresión como la función sigmoide  $\sigma(x)$ :

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (5.5)$$

lo que resulta en:

$$\hat{y} = \sigma(f(\vec{x})) = \frac{1}{1 + e^{-\vec{x} \cdot \vec{w} + b}} \quad (5.6)$$

La función sigmoide es monótona creciente y mapea los valores al rango  $[0, 1]$ , con 0 mapeado a  $\frac{1}{2}$ . Cuando se utiliza con una función de pérdida adecuada (que se discutirá más adelante), las predicciones binarias realizadas mediante el modelo log-lineal se pueden interpretar como estimaciones de la probabilidad de pertenencia a la clase:

$$\sigma(f(\vec{x})) = P(\hat{y} = 1 | \vec{x}) \quad \text{de que } \vec{x} \text{ pertenezca a la clase positiva.} \quad (5.7)$$

También obtenemos  $P(\hat{y} = 0 | \vec{x}) = 1 - P(\hat{y} = 1 | \vec{x}) = 1 - \sigma(f(\vec{x}))$ . Cuanto más cercano sea el valor a 0 o 1, más seguro está el modelo en su predicción de pertenencia a la clase, y el valor 0,5 indica incertidumbre del modelo.

### 5.4. Clasificación multiclas

La mayoría de los problemas de clasificación son de naturaleza multiclas: se asignan ejemplos a una de las  $k$  clases diferentes. Por ejemplo, se nos puede dar un documento y se nos pide clasificarlo en uno de los seis posibles idiomas: inglés, francés, alemán, italiano, español y otros.

Una solución posible es considerar seis vectores de pesos  $\vec{w}_{EN}, \vec{w}_{FR}, \dots$  y sesgos (uno para cada idioma). Predecimos el idioma que resulta en el puntaje más alto:

$$\hat{y} = f(\vec{x}) = \operatorname{argmax}_{L \in \{EN, FR, GR, IT, SP, O\}} \vec{x} \cdot \vec{w}_L + b_L \quad (5.8)$$

Los seis conjuntos de parámetros  $\vec{w}_L \in \mathcal{R}^{784}$  y  $b_L$  se pueden organizar en una matriz  $W \in \mathcal{R}^{784 \times 6}$  y un vector  $\vec{b} \in \mathcal{R}^6$ , y la ecuación se puede reescribir como:

$$\begin{aligned}\vec{y} &= f(\vec{x}) = \vec{x} \cdot W + \vec{b} \\ \text{predicción} &= \hat{y} = \operatorname{argmax}_i \vec{y}_{[i]}\end{aligned}\tag{5.9}$$

Aquí,  $\vec{y} \in \mathcal{R}^6$  es un vector de los puntajes asignados por el modelo a cada idioma, y determinamos el idioma predicho tomando el argmax sobre las entradas de  $\vec{y}$  (las columnas con el valor más alto).

## 5.5. Representaciones

Consideremos el vector  $\vec{y}$  resultante de aplicar un modelo entrenado a un documento. Podemos considerar que este vector es una representación del documento, ya que captura las propiedades del documento que son importantes para nosotros, es decir, los puntajes de los diferentes idiomas. La representación  $\vec{y}$  contiene estrictamente más información que la predicción  $\operatorname{argmax}_i \vec{y}_{[i]}$ .

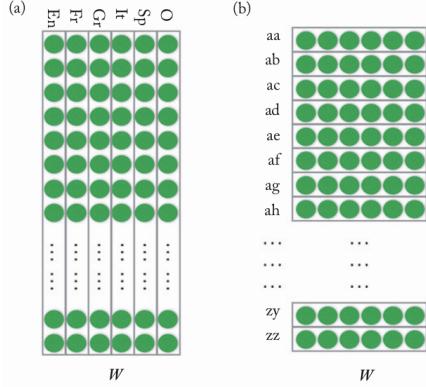
Por ejemplo,  $\vec{y}$  se puede utilizar para distinguir documentos en los que el idioma principal es el alemán, pero que también contienen una cantidad considerable de palabras en francés. El agrupamiento de documentos basado en  $\vec{y}$  podría ayudar a descubrir documentos escritos en dialectos regionales o por autores multilingües.

Los vectores  $\vec{x}$  que contienen los recuentos normalizados de los bigramas de letras para los documentos también son representaciones de los documentos. Se podría argumentar que contienen un tipo de información similar a los vectores  $\vec{y}$ . Sin embargo, las representaciones en  $\vec{y}$  son más compactas (6 entradas en lugar de 784) y más especializadas para el objetivo de predicción de idioma. El agrupamiento por los vectores  $\vec{x}$  probablemente revelaría similitudes en los documentos que no se deben a una mezcla particular de idiomas, sino tal vez al tema o estilo de escritura del documento.

La matriz entrenada  $W \in \mathcal{R}^{784 \times 6}$  también se puede considerar como una representación aprendida. Podemos considerar dos vistas de  $W$ , como filas o como columnas.

Dos vistas de la matriz  $W$ . (a) Cada columna corresponde a un idioma. (b) Cada fila corresponde a un bigrama de letras. Fuente: [Goldberg, 2017].

Una columna de  $W$  puede tomarse como una representación vectorial de 784 dimensiones de un idioma en términos de sus patrones característicos de bigramas de letras. Luego, podemos agrupar los 6 vectores de idioma según su similitud. Cada una de las 784 filas de  $W$  proporciona una representación vectorial de 6 dimensiones de ese bigrama en términos de los idiomas que promueve. Las representaciones son fundamentales para el aprendizaje profundo.



Se podría argumentar que el principal poder del aprendizaje profundo es la capacidad de aprender buenas representaciones.

En el caso lineal, las representaciones son interpretables, ya que podemos asignar una interpretación significativa a cada dimensión en el vector de representación. Por ejemplo, cada dimensión puede corresponder a un idioma o a un determinado bigrama de letras.

Por otro lado, los modelos de aprendizaje profundo a menudo aprenden una cascada de representaciones de la entrada que se construyen una encima de la otra. Estas representaciones a menudo no son interpretables, es decir, no sabemos qué propiedades de la entrada capturan. Sin embargo, siguen siendo muy útiles para hacer predicciones.

## 5.6. Representación de Vectores One-Hot

El vector de entrada  $\vec{x}$  en nuestro ejemplo de clasificación de idioma contiene los recuentos normalizados de los bigramas en el documento  $D$ . Este vector se puede descomponer en un promedio de  $|D|$  vectores, cada uno correspondiente a una posición particular del documento  $i$ :

$$\vec{x} = \frac{1}{|D|} \sum_{i=1}^{|D|} \vec{x}^{D_{[i]}} \quad (5.10)$$

Aquí,  $D_{[i]}$  es el bigrama en la posición  $i$  del documento. Cada vector  $\vec{x}^{D_{[i]}} \in \mathcal{R}^{784}$  es un vector one-hot, lo que significa que todos los elementos son cero excepto la única entrada que corresponde al bigrama de letras  $D_{[i]}$ , que es 1. El vector resultante  $\vec{x}$  se conoce comúnmente como un promedio de bolsa de bigramas (más generalmente, una bolsa de palabras promediada, o simplemente una bolsa de palabras).

Las representaciones de bolsa de palabras contienen información sobre las identidades de todas las "palabras"(en este caso, bigramas) del documento, sin

considerar su orden. Una representación one-hot se puede considerar como una bolsa de una sola "palabra".

$$\begin{aligned}
 & \text{Rome} \xrightarrow{\text{Paris}} \text{Rome} = [1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, \dots, 0] \\
 & \text{Paris} = [0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, \dots, 0] \\
 & \text{Italy} = [0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, \dots, 0] \\
 & \text{France} = [0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, \dots, 0]
 \end{aligned}$$

Vectores one-hot de palabras.

Fuente: <https://medium.com/@athif.shaffy/one-hot-encoding-of-text-b69124bef0a7>.

En el caso binario, transformamos la predicción lineal en una estimación de probabilidad al pasarla por la función sigmoide, lo que resulta en un modelo log-lineal. En el caso de múltiples clases, el análogo es pasar el vector de puntajes a través de la función **softmax**:

$$\text{softmax}(\vec{x})_{[i]} = \frac{e^{\vec{x}_{[i]}}}{\sum_j e^{\vec{x}_{[j]}}} \quad (5.11)$$

Lo que resulta en:

$$\begin{aligned}
 \vec{\hat{y}} &= \text{softmax}(\vec{x} \cdot W + \vec{b}) \\
 \vec{\hat{y}}_{[i]} &= \frac{e^{(\vec{x} \cdot W + \vec{b})_{[i]}}}{\sum_j e^{(\vec{x} \cdot W + \vec{b})_{[j]}}}
 \end{aligned} \quad (5.12)$$

La transformación softmax fuerza a los valores en  $\vec{\hat{y}}$  a ser positivos y sumar 1, lo que los hace interpretables como una distribución de probabilidad.

## 5.7. Entrenamiento

Cuando se entrena una función parametrizada (por ejemplo, un modelo lineal, una red neuronal), se define una función de pérdida  $L(\hat{y}, y)$ , que establece la pérdida al predecir  $\hat{y}$  cuando la salida verdadera es  $y$ .

$$L(f(\vec{x}; \Theta), y)$$

Utilizamos el símbolo  $\Theta$  para denotar todos los parámetros del modelo (por ejemplo,  $W, \vec{b}$ ).

El objetivo del entrenamiento es minimizar la pérdida en los diferentes ejemplos de entrenamiento. Formalmente, una función de pérdida  $L(\hat{y}, y)$  asigna una puntuación numérica (un escalar) a una salida predicha  $\hat{y}$  dada la salida

esperada verdadera  $y$ . La función de pérdida debería alcanzar su valor mínimo para los casos en los que la predicción sea correcta.

También podemos definir una pérdida en todo el corpus con respecto a los parámetros  $\Theta$  como la pérdida promedio en todos los ejemplos de entrenamiento:

$$\mathcal{L}(\Theta) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L(f(\vec{x}_i; \Theta), y_i)$$

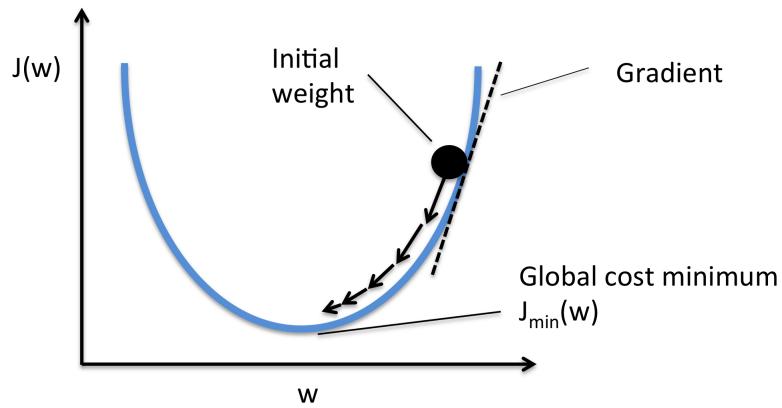
El objetivo del algoritmo de entrenamiento es establecer los valores de los parámetros  $\Theta$  de manera que el valor de  $\mathcal{L}$  se minimice.

$$\hat{\Theta} = \operatorname{argmin}_{\Theta} \mathcal{L}(\Theta) = \operatorname{argmin}_{\Theta} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L(f(\vec{x}_i; \Theta), y_i)$$

### 5.7.1. Optimización basada en Gradiente

Las funciones se entrena utilizando métodos basados en gradientes. Estos métodos funcionan mediante el cálculo repetido de una estimación de la pérdida  $L$  sobre el conjunto de entrenamiento. El método de entrenamiento calcula los gradientes de los parámetros ( $\Theta$ ) con respecto a la estimación de pérdida y mueve los parámetros en la dirección opuesta al gradiente. Los diferentes métodos de optimización difieren en cómo se calcula la estimación de error y cómo se define el movimiento en la dirección opuesta al gradiente.

Si la función es convexa, el óptimo será global. De lo contrario, el proceso solo garantiza encontrar un óptimo local.




---

<sup>0</sup>Fuente: <https://sebastianraschka.com/images/faq/closed-form-vs-gd/ball.png>  
<sup>0</sup>[Goodfellow et al., 2016]

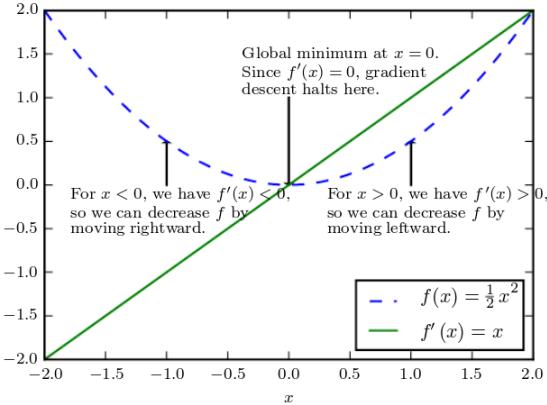


Figure 4.1: Gradient descent. An illustration of how the gradient descent algorithm uses the derivatives of a function to follow the function downhill to a minimum.

### 5.7.2. Descenso de Gradiente Estocástico en Línea

- Todos los parámetros se inicializan con valores aleatorios ( $\Theta$ ).
- Para cada ejemplo de entrenamiento  $(x, y)$ , calculamos la pérdida  $L$  con los valores actuales de  $\Theta$ .
- Luego actualizamos los parámetros con la siguiente regla hasta que se alcance la convergencia:
- $\Theta_i \leftarrow \Theta_i - \eta \frac{\partial L}{\partial \Theta_i}(\hat{y}, y)$  (para todos los parámetros  $\Theta_i$ )

---

**Algorithm 2.1** Online stochastic gradient descent training.

---

*Input:*

- Function  $f(x; \Theta)$  parameterized with parameters  $\Theta$ .
  - Training set of inputs  $x_1, \dots, x_n$  and desired outputs  $y_1, \dots, y_n$ .
  - Loss function  $L$ .
- 

```

1: while stopping criteria not met do
2:   Sample a training example  $x_i, y_i$ 
3:   Compute the loss  $L(f(x_i; \Theta), y_i)$ 
4:    $\hat{g} \leftarrow$  gradients of  $L(f(x_i; \Theta), y_i)$  w.r.t  $\Theta$ 
5:    $\Theta \leftarrow \Theta - \eta_t \hat{g}$ 
6: return  $\Theta$ 

```

---

La tasa de aprendizaje puede ser fija durante todo el proceso de entrenamiento o puede decrecer como función del paso de tiempo  $t$ . El error calculado en la línea 3 se basa en un solo ejemplo de entrenamiento y, por lo tanto, es solo

---

<sup>0</sup>Fuente:[Goldberg, 2017]

una estimación aproximada de la pérdida en todo el corpus  $L$  que queremos minimizar. El ruido en el cálculo de la pérdida puede resultar en gradientes inexactos (los ejemplos individuales pueden proporcionar información ruidosa).

### 5.7.3. Descenso de Gradiente Estocástico en Mini-batch

- Una forma común de reducir este ruido es estimar el error y los gradientes en función de una muestra de  $m$  ejemplos.
- Esto da lugar al algoritmo de SGD en mini-batch.

---

**Algorithm 2.2** Minibatch stochastic gradient descent training.

---

*Input:*

- Function  $f(x; \Theta)$  parameterized with parameters  $\Theta$ .
- Training set of inputs  $x_1, \dots, x_n$  and desired outputs  $y_1, \dots, y_n$ .
- Loss function  $L$ .

---

```

1: while stopping criteria not met do
2:   Sample a minibatch of  $m$  examples  $\{(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)\}$ 
3:    $\hat{g} \leftarrow 0$ 
4:   for  $i = 1$  to  $m$  do
5:     Compute the loss  $L(f(x_i; \Theta), y_i)$ 
6:      $\hat{g} \leftarrow \hat{g} +$  gradients of  $\frac{1}{m}L(f(x_i; \Theta), y_i)$  w.r.t  $\Theta$ 
7:    $\Theta \leftarrow \Theta - \eta_i \hat{g}$ 
8: return  $\Theta$ 

```

---

Valores más altos de  $m$  proporcionan mejores estimaciones de los gradientes en todo el corpus, mientras que valores más pequeños permiten más actualizaciones y, a su vez, una convergencia más rápida.

Para tamaños moderados de

$m$ , algunas arquitecturas de cómputo (por ejemplo, GPUs) permiten una implementación paralela eficiente del cálculo en las líneas 3-6.

### 5.7.4. Funciones de Pérdida

Las funciones de pérdida son utilizadas en algoritmos de aprendizaje automático para medir la discrepancia entre las predicciones del modelo y los valores reales de los datos de entrenamiento. Algunas funciones de pérdida comunes son:

- Pérdida Hinge (o pérdida SVM): utilizada en problemas de clasificación binaria, donde la salida del clasificador es un escalar  $\tilde{y}$  y la salida deseada  $y$  está en el conjunto  $\{+1, -1\}$ . La regla de clasificación es  $\hat{y} = \text{signo}(\tilde{y})$ , y se considera una clasificación correcta si  $y \cdot \tilde{y} > 0$ . La función de pérdida se define como:

$$L_{\text{hinge(binaria)}}(\tilde{y}, y) = \max(0, 1 - y \cdot \tilde{y})$$

---

<sup>0</sup>Fuente:[Goldberg, 2017]

- Entropía cruzada binaria (o pérdida logística): utilizada en clasificación binaria con salidas de probabilidad condicional. La salida del clasificador  $\hat{y}$  se transforma utilizando la función sigmoide para que esté en el rango  $[0, 1]$ , y se interpreta como la probabilidad condicional  $P(y = 1|x)$ . La función de pérdida se define como:

$$L_{\text{logística}}(\hat{y}, y) = -y \log \hat{y} - (1 - y) \log(1 - \hat{y})$$

- La pérdida logística tiene una interpretación probabilística. Se asume que  $P(y = 1|\vec{x}; \Theta) = \sigma(f(\vec{x})) = \frac{1}{1+e^{-\vec{w} \cdot \vec{x}}} \approx \hat{y}$  y  $P(y = 0|\vec{x}; \Theta) = 1 - \sigma(f(\vec{x})) \approx 1 - \hat{y}$ . Esto se puede escribir de manera más compacta como:

$$P(y|\vec{x}; \Theta) = \sigma(f(\vec{x}))^y \times (1 - \sigma(f(\vec{x})))^{1-y}$$

- La expresión anterior es la función de masa de probabilidad de la distribución de Bernoulli.
- Si reemplazamos  $\sigma(f(\vec{x}))$  por  $\hat{y}$ , obtenemos:

$$P(y|\vec{x}; \Theta) = \hat{y}^y \times (1 - \hat{y})^{1-y}$$

- Si aplicamos la estimación de máxima verosimilitud a esta expresión y tomamos el logaritmo, obtenemos:

$$y \log \hat{y} + (1 - y) \log(1 - \hat{y})$$

- Maximizar esta expresión es equivalente a minimizar la pérdida logística!
- Muchas funciones de pérdida corresponden al logaritmo negativo de la verosimilitud de modelos probabilísticos!
- Pérdida de entropía cruzada categórica: se utiliza cuando se desea una interpretación probabilística de las puntuaciones de múltiples clases. Mide la discrepancia entre la distribución de etiquetas reales  $\vec{y}$  y la distribución de etiquetas predichas  $\vec{\hat{y}}$ . La función de pérdida se define como:

$$L_{\text{entropía cruzada}}(\vec{\hat{y}}, \vec{y}) = - \sum_i \vec{y}_{[i]} \log(\vec{\hat{y}}_{[i]})$$

- Cuando se utiliza la pérdida de entropía cruzada, se asume que la salida del clasificador se transforma utilizando la función softmax.
- La función softmax comprime la salida de  $k$  dimensiones a valores en el rango  $(0,1)$  de modo que todas las entradas sumen 1. Por lo tanto,  $\vec{\hat{y}}_{[i]} = P(y = i|x)$  representa la distribución de pertenencia a la clase condicional.

- Para problemas de clasificación dura en los que cada ejemplo de entrenamiento tiene una única asignación de clase correcta,  $\vec{y}$  es un vector one-hot que representa la clase verdadera. En tales casos, la entropía cruzada se simplifica a:

$$L_{\text{entropía cruzada (clasificación dura)}}(\vec{\hat{y}}, \vec{y}) = -\log(\vec{\hat{y}}_{[t]})$$

donde  $t$  es la asignación de clase correcta.

## 5.8. Regularización

Nuestro problema de optimización puede tener múltiples soluciones y, especialmente en dimensiones más altas, puede sufrir de sobreajuste. Consideremos el siguiente escenario en nuestro problema de identificación de idioma: uno de los documentos en el conjunto de entrenamiento ( $\vec{x}_O$ ) es un valor atípico. En realidad, el documento está en alemán, pero está etiquetado como francés.

Para reducir la pérdida, el modelo puede identificar características (bigramas de letras) en  $\vec{x}_O$  que ocurren en pocos otros documentos. El modelo asignará a estas características pesos muy altos hacia la clase francesa (incorrecta). Esto es una solución incorrecta para el problema de aprendizaje, ya que el modelo está aprendiendo algo incorrecto. Los documentos alemanes que comparten muchas palabras con  $\vec{x}_O$  podrían clasificarse erróneamente como franceses. Nos gustaría controlar estos casos y alejar al modelo de soluciones equivocadas.

La idea de la regularización es agregar un término de regularización  $R$  al objetivo de optimización. El objetivo de este término es controlar la complejidad (pesos grandes) del valor de los parámetros ( $\Theta$ ) y evitar el sobreajuste:

$$\begin{aligned}\hat{\Theta} &= \operatorname{argmin}_{\Theta} \mathcal{L}(\Theta) + \lambda R(\Theta) \\ &= \operatorname{argmin}_{\Theta} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L(f(\vec{x}_i; \Theta), y_i) + \lambda R(\Theta)\end{aligned}\tag{5.13}$$

El término de regularización considera los valores de los parámetros y evalúa su complejidad. El valor del hiperparámetro  $\lambda$  debe establecerse manualmente en función del rendimiento de clasificación en un conjunto de desarrollo.

En la práctica, los regularizadores  $R$  consideran la complejidad como pesos grandes. Trabajan para mantener los valores de los parámetros ( $\Theta$ ) bajos. Las opciones comunes para  $R$  son la norma  $L_2$ , la norma  $L_1$  y la elastic-net.

### 5.8.1. Regularización $L_2$

En la regularización  $L_2$ ,  $R$  toma la forma de la norma al cuadrado  $L_2$  de los parámetros. El objetivo es mantener baja la suma de los cuadrados de los valores de los parámetros:

$$R_{L_2}(W) = \|W\|_2^2 = \sum_{i,j} (W_{[i,l]})^2$$

El regularizador  $L_2$  también se llama una priori gaussiana o decaimiento de peso. Los modelos regularizados con  $L_2$  se ven severamente penalizados por pesos de parámetros altos. Una vez que el valor está lo suficientemente cerca de cero, su efecto se vuelve insignificante. El modelo preferirá disminuir el valor de un parámetro con peso alto en 1 en lugar de disminuir el valor de diez parámetros que ya tienen pesos relativamente bajos en 0.1 cada uno.

### 5.8.2. Regularización $L_1$

En la regularización  $L_1$ ,  $R$  toma la forma de la norma  $L_1$  de los parámetros. El objetivo es mantener baja la suma de los valores absolutos de los parámetros:

$$R_{L_1}(W) = \|W\|_1 = \sum_{i,j} |W_{[i,l]}|$$

A diferencia de  $L_2$ , el regularizador  $L_1$  se penaliza de manera uniforme para valores bajos y altos. Tiene incentivos para disminuir todos los valores de parámetros no nulos hacia cero. Por lo tanto, fomenta soluciones dispersas, es decir, modelos con muchos parámetros con valor cero. El regularizador  $L_1$  también se llama una priori dispersa o lasso [Tibshirani, 1996].

### 5.8.3. Elastic-Net

El método de regularización elastic-net [Zou and Hastie, 2005] combina tanto la regularización  $L_1$  como la regularización  $L_2$  de la siguiente manera:

$$R_{\text{elastic-net}}(W) = \lambda_1 R_{L_1}(W) + \lambda_2 R_{L_2}(W)$$

## 5.9. Más allá del SGD

Aunque el algoritmo SGD puede producir buenos resultados, también existen algoritmos más avanzados disponibles. Los algoritmos SGD+Momentum [Polyak, 1964] y Nesterov Momentum [Nesterov, 2018, Sutskever et al., 2013] son variantes de SGD en las que los gradientes anteriores se acumulan y afectan la actualización actual. Los algoritmos de tasa de aprendizaje adaptativa, como AdaGrad [Duchi et al., 2011], AdaDelta [Zeiler, 2012], RMSProp [Tieleman and Hinton, 2012] y Adam [Kingma and Ba, 2014], están diseñados para seleccionar la tasa de aprendizaje para cada minibatch. A veces, esto se hace de manera individual por coordenada, lo que puede aliviar la necesidad de ajustar la programación de la tasa de aprendizaje. Para obtener más detalles sobre estos algoritmos, consulte los documentos originales o [Goodfellow et al., 2016] (Secciones 8.3, 8.4).

## 5.10. Conjuntos de entrenamiento, prueba y validación

Cuando entrenamos un modelo, nuestro objetivo es producir una función  $f(\vec{x})$  que mapee correctamente las entradas  $\vec{x}$  a las salidas  $\hat{y}$  según lo evidenciado por el conjunto de entrenamiento. La evaluación del rendimiento en los datos de entrenamiento puede ser engañosa, ya que nuestro objetivo es entrenar una función capaz de generalizar a ejemplos no vistos. Una forma común de abordar esto es dividir el conjunto de entrenamiento en subconjuntos de entrenamiento y prueba (80 % y 20 % respectivamente). Se entrena el modelo en el subconjunto de entrenamiento y se calcula la precisión en el subconjunto de prueba.

Sin embargo, este enfoque tiene una limitación. En la práctica, a menudo se entrenan varios modelos, se comparan sus calidades y se selecciona el mejor. Si se selecciona el mejor modelo en función de la precisión en el subconjunto de prueba, se obtendrá una estimación excesivamente optimista de la calidad del modelo. No se sabe si la configuración elegida del clasificador final es buena en general o simplemente es buena para los ejemplos particulares en los subconjuntos de prueba.

La metodología aceptada es utilizar una división de tres vías de los datos en conjuntos de entrenamiento, validación (también llamado desarrollo) y prueba<sup>1</sup>. Esto proporciona dos conjuntos apartados: un conjunto de validación (también llamado conjunto de desarrollo) y un conjunto de prueba. Todos los experimentos, ajustes, análisis de errores y selección de modelos deben realizarse

basados en el conjunto de validación. Luego, una única ejecución del modelo final sobre el conjunto de prueba proporcionará una buena estimación de su calidad esperada en ejemplos no vistos. Es importante mantener el conjunto de prueba lo más limpio posible, realizando la menor cantidad de experimentos posible en él. Incluso algunos defienden que no se deben mirar siquiera los ejemplos en el conjunto de prueba, para evitar sesgar el diseño del modelo.

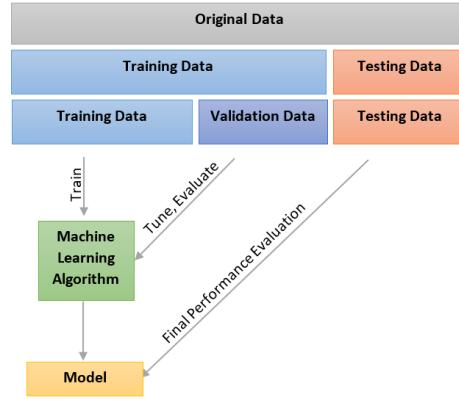
## 5.11. Una limitación de los modelos lineales: el problema XOR

La clase de hipótesis de modelos lineales (y log-lineales) está severamente restringida. Por ejemplo, no puede representar la función XOR, definida como:

---

<sup>1</sup>Un enfoque alternativo es la validación cruzada, pero no se escala bien para entrenar redes neuronales profundas.

<sup>1</sup>Fuente: <https://www.codeproject.com/KB/AI/1146582/validation.PNG>

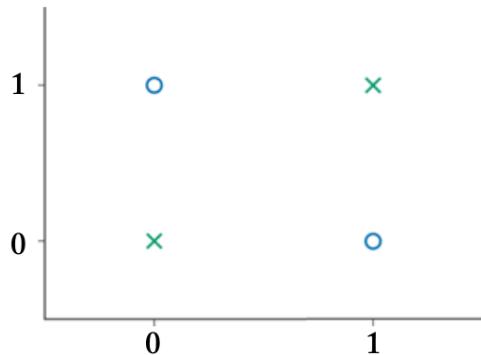


$$\begin{aligned}
 \text{xor}(0, 0) &= 0 \\
 \text{xor}(1, 0) &= 1 \\
 \text{xor}(0, 1) &= 1 \\
 \text{xor}(1, 1) &= 0
 \end{aligned} \tag{5.14}$$

No existe una parametrización  $\vec{w} \in \mathbb{R}^2, b \in \mathbb{R}$  tal que:

$$\begin{aligned}
 (0, 0) \cdot \vec{w} + b &< 0 \\
 (0, 1) \cdot \vec{w} + b &\geq 0 \\
 (1, 0) \cdot \vec{w} + b &\geq 0 \\
 (1, 1) \cdot \vec{w} + b &< 0
 \end{aligned} \tag{5.15}$$

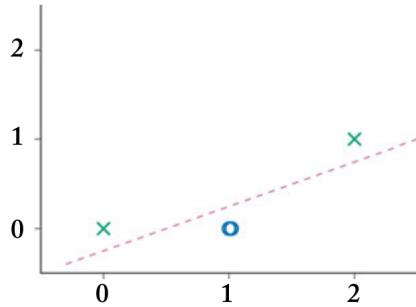
Para ver por qué, consideremos el siguiente gráfico de la función XOR, donde los Os azules denotan la clase positiva y las X verdes la clase negativa.



Es evidente que ninguna línea recta puede separar las dos clases.

### 5.11.1. Transformaciones no lineales de las entradas

Si transformamos los puntos alimentándolos a través de la función no lineal  $\phi(x_1, x_2) = [x_1 \times x_2, x_1 + x_2]$ , el problema XOR se vuelve linealmente separable.



La función  $\phi$  mapea los datos a una representación adecuada para la clasificación lineal. Ahora podemos entrenar fácilmente un clasificador lineal para resolver el problema XOR.

$$\hat{y} = f(\vec{x}) = \phi(\vec{x}) \cdot \vec{w} + b \quad (5.16)$$

El problema es que necesitamos definir manualmente la función  $\phi$ . Este proceso depende del conjunto de datos particular y requiere mucha intuición humana. La solución es definir una función de mapeo no lineal entrenable y entrenarla junto con el clasificador lineal. Encontrar la representación adecuada se convierte en responsabilidad del algoritmo de entrenamiento.

Las funciones de mapeo pueden tomar la forma de un modelo lineal parametrizado, seguido de una función de activación no lineal  $g$  que se aplica a cada una de las dimensiones de salida:

$$\begin{aligned} \hat{y} &= f(\vec{x}) = \phi(\vec{x}) \cdot \vec{w} + b \\ \phi(\vec{x}) &= g(\vec{x}W' + \vec{b}') \end{aligned} \quad (5.17)$$

Si tomamos  $g(x) = \max(0, x)$  y  $W' = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$ ,  $\vec{b}' = (-1 \ 0)$ , obtenemos un mapeo equivalente a  $[x_1 \times x_2, x_1 + x_2]$  para nuestros puntos de interés (0,0), (0,1), (1,0) y (1,1). ¡Esto resuelve con éxito el problema XOR!

Aprender tanto la función de representación como el clasificador lineal en la parte superior de ella al mismo tiempo es la idea principal detrás del aprendizaje profundo y las redes neuronales. De hecho, la ecuación anterior describe una arquitectura de red neuronal muy común llamada perceptrón multicapa (MLP, por sus siglas en inglés).

# Capítulo 6

## Redes Neuronales

- Las redes neuronales son una familia muy popular de modelos de aprendizaje automático formados por unidades llamadas **neuronas**.
- Una neurona es una unidad computacional que tiene entradas y salidas escalares.
- Cada entrada tiene asociado un peso  $w$ .
- La neurona multiplica cada entrada por su peso y luego los suma (también son posibles otras funciones como **max**).
- Aplica una función de activación  $g$  (generalmente no lineal) al resultado y lo pasa a su salida.
- Se pueden apilar múltiples capas.
- La función de activación no lineal  $g$  juega un papel crucial en la capacidad de la red para representar funciones complejas.
- Sin la no linealidad en  $g$ , la red neuronal solo puede representar transformaciones lineales de la entrada.

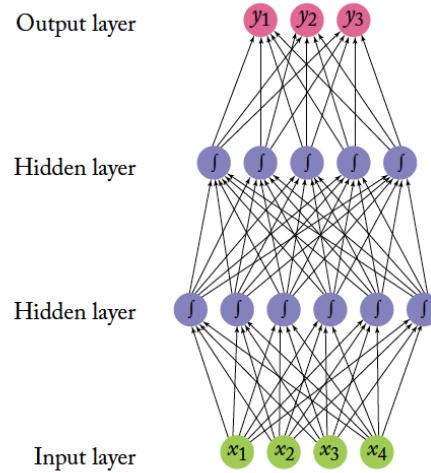
Ejemplo: Red feedforward con dos capas

### 6.1. Redes neuronales feedforward

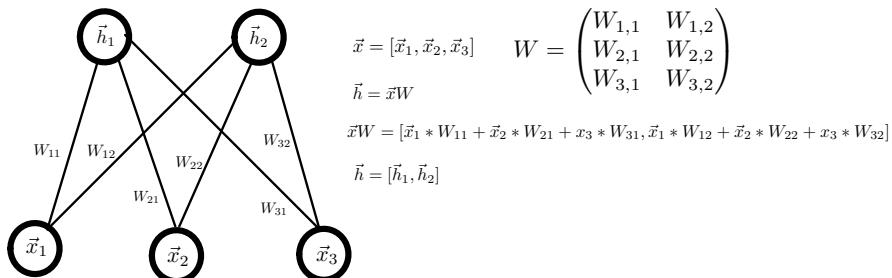
- La red feedforward de la imagen es una concatenación de modelos lineales separados por funciones no lineales.
- Los valores de cada fila de neuronas en la red se pueden pensar como un vector.

---

<sup>0</sup>Fuente:[Goldberg, 2017]



- La capa de entrada es un vector de 4 dimensiones ( $\vec{x}$ ), y la capa superior es un vector de 6 dimensiones ( $\vec{h}^1$ ).
- La capa completamente conectada se puede pensar como una transformación lineal de 4 dimensiones a 6 dimensiones.
- Una capa completamente conectada implementa una multiplicación de vector-matriz,  $\vec{h} = \vec{x}W$ .
- El peso de la conexión desde la neurona  $i$ -ésima en la fila de entrada hasta la neurona  $j$ -ésima en la fila de salida es  $W_{[i,j]}$ .
- Los valores de  $\vec{h}$  se transforman mediante una función no lineal  $g$  que se aplica a cada valor antes de pasar al siguiente nivel.



<sup>0</sup>Se asume que los vectores son vectores fila y los índices en superíndices corresponden a las capas de la red.

## Capas completamente conectadas como multiplicaciones de vectores y matrices

### 6.1.1. Redes neuronales como funciones matemáticas

- El Perceptrón Multicapa (MLP, por sus siglas en inglés) de la figura se llama MLP2 porque tiene dos capas ocultas.
- Un modelo más simple sería MLP1, un perceptrón multicapa de una capa oculta:

$$\vec{y} = NN_{MLP1}(\vec{x}) = g(\vec{x}W^1 + \vec{b}^1)W^2 + \vec{b}^2$$

$$\vec{x} \in \mathcal{R}^{d_{in}}, W^1 \in \mathcal{R}^{d_{in} \times d_1}, \vec{b}^1 \in \mathcal{R}^{d_1}, W^2 \in \mathcal{R}^{d_1 \times d_{out}}, \vec{b}^2 \in \mathcal{R}^{d_{out}}, \vec{y} \in \mathcal{R}^{d_{out}}$$

(6.1)

- Aquí,  $W^1$  y  $\vec{b}^1$  son una matriz y un término de sesgo para la primera transformación lineal de la entrada.
- La función  $g$  es una función no lineal que se aplica elemento a elemento (también se llama no linealidad o función de activación).
- $W^2$  y  $\vec{b}^2$  son la matriz y el término de sesgo para una segunda transformación lineal.
- Al describir una red neuronal, se deben especificar las dimensiones de las capas ( $d_1$ ), la entrada ( $d_{in}$ ) y la salida ( $d_{out}$ ).
- MLP2 se puede escribir como la siguiente función matemática:

$$NN_{MLP2}(\vec{x}) = \vec{y}$$

$$\vec{h}^1 = \vec{x}W^1 + \vec{b}^1$$

$$\vec{h}^2 = g^1(\vec{h}^1)W^2 + \vec{b}^2$$

$$\vec{y} = g^2(\vec{h}^2)W^3$$

$$\vec{y} = (g^2(g^1(\vec{x}W^1 + \vec{b}^1)W^2 + \vec{b}^2))W^3.$$

(6.2)

- Las matrices y los términos de sesgo que definen las transformaciones lineales son los parámetros de la red.
- Al igual que en los modelos lineales, es común referirse a la colección de todos los parámetros como  $\Theta$ .

## 6.2. Capacidad de representación

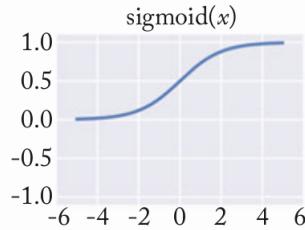
- [Hornik et al., 1989] y [Cybenko, 1989] mostraron que un perceptrón multicapa de una capa oculta (MLP1) es un aproximador universal.
- MLP1 puede aproximar todas las funciones continuas en un subconjunto cerrado y acotado de  $\mathcal{R}^n$ .
- Esto puede sugerir que no hay razón para ir más allá de MLP1 en arquitecturas más complejas.
- El resultado no dice qué tan fácil o difícil es establecer los parámetros basándose en los datos de entrenamiento y un algoritmo de aprendizaje específico.
- Tampoco garantiza que un algoritmo de entrenamiento encontrará la función correcta que genera nuestros datos de entrenamiento.
- Finalmente, no establece qué tan grande debería ser la capa oculta.
- En la práctica, entrenamos redes neuronales con cantidades relativamente pequeñas de datos utilizando métodos de búsqueda local.
- También utilizamos capas ocultas de tamaños relativamente modestos (hasta varios miles).
- El teorema de aproximación universal no ofrece ninguna garantía bajo estas condiciones.
- Sin embargo, definitivamente hay beneficios en probar arquitecturas más complejas que MLP1.
- En muchos casos, sin embargo, MLP1 brinda resultados sólidos.

## 6.3. Funciones de activación

- La no linealidad  $g$  puede tomar muchas formas.
- Actualmente no existe una buena teoría sobre qué no linealidad aplicar en qué condiciones.
- Elegir la no linealidad correcta para una tarea determinada es en su mayor parte una cuestión empírica.

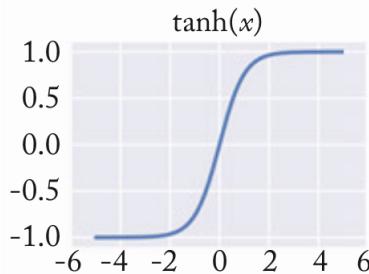
## Sigmoide

- La función de activación sigmoide  $\sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$  es una función en forma de S, que transforma cada valor  $x$  en el rango  $[0, 1]$ .
- El sigmoide fue la no linealidad canónica para las redes neuronales desde su inicio.
- Actualmente se considera obsoleta para su uso en capas internas de redes neuronales, ya que las opciones que se enumeran a continuación funcionan mucho mejor empíricamente.



## Tangente hiperbólica (tanh)

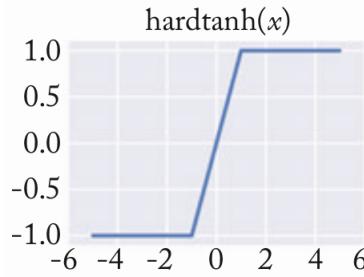
- La función de activación tangente hiperbólica  $\tanh(x) = \frac{e^{2x}-1}{e^{2x}+1}$  es una función en forma de S que transforma los valores  $x$  en el rango  $[-1, 1]$ .



## Hard tanh

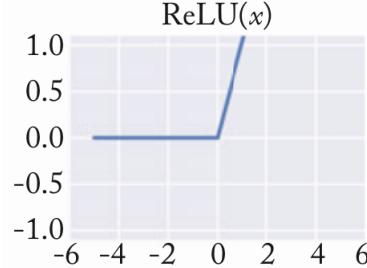
- La función de activación hard-tanh es una aproximación de la función tangente hiperbólica que es más rápida de calcular y encontrar sus derivadas:

$$\text{hardtanh}(x) = \begin{cases} -1 & x < -1 \\ 1 & x > 1 \\ x & \text{en otros casos.} \end{cases}$$



### ReLU

- La función de activación rectificador [Glorot et al., 2011], también conocida como unidad lineal rectificada, es una función de activación muy simple.
- Es fácil de trabajar y se ha demostrado muchas veces que produce excelentes resultados.
- La función ReLU se define como  $\text{ReLU}(x) = \max(0, x)$ .



### Leaky ReLU

- La función Leaky ReLU es similar a ReLU, pero permite una pequeña pendiente para valores negativos.
- Se define como  $\text{LeakyReLU}(x) = \max(\alpha x, x)$ , donde  $\alpha$  es un hiperparámetro pequeño (por lo general, en el rango de 0,01 a 0,2).

### ELU

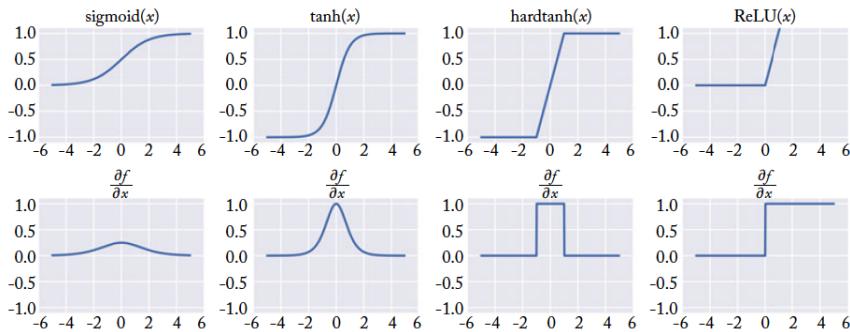
- La función de activación ELU (Exponential Linear Unit) [?] es una versión mejorada de ReLU que también tiene una pendiente para valores negativos.

- Se define como  $ELU(x) = \begin{cases} \alpha(e^x - 1) & x < 0 \\ x & \text{en otros casos.} \end{cases}$
- Aquí,  $\alpha$  es un hiperparámetro que controla la pendiente negativa.

Estas son solo algunas de las muchas opciones disponibles para las funciones de activación en redes neuronales. La elección de la función de activación puede depender del problema específico y puede requerir pruebas empíricas para determinar cuál funciona mejor.

### 6.3.1. Problemas Prácticos

En términos generales, tanto las unidades ReLU como las unidades tangente hiperbólica ( $\tanh$ ) funcionan bien y superan significativamente a la función sigmoidal. Sin embargo, puede ser beneficioso experimentar con ambas activations, ya que cada una puede funcionar mejor en diferentes configuraciones. La Figura 1 muestra las formas de las diferentes funciones de activación, junto con las formas de sus derivadas.



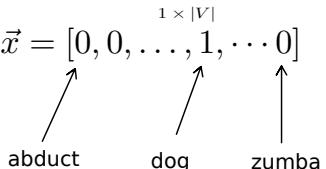
## 6.4. Capas de Embedding

En el procesamiento del lenguaje natural (PLN), la entrada a la red neuronal contiene características categóricas simbólicas (por ejemplo, palabras de un vocabulario cerrado, n-gramas de caracteres, etiquetas POS). En los modelos lineales, generalmente representamos la entrada con vectores dispersos, como la suma, el promedio o la concatenación de vectores codificados one-hot (la suma o el promedio pueden producir una representación de bolsa de palabras). En las redes neuronales, es común asociar cada valor de característica posible (es decir, cada palabra en el vocabulario, cada categoría de etiqueta POS) con un vector denso de  $d$  dimensiones.

---

<sup>0</sup>Fuente:[Goldberg, 2017]

Estos vectores luego se consideran parámetros del modelo y se entrena conjuntamente con los demás parámetros. El mapeo desde valores de características simbólicas, como "número de palabra 1249", a vectores de  $d$  dimensiones se realiza mediante una capa de embedding (también llamada capa de búsqueda). Los parámetros en una capa de embedding de palabras son simplemente una matriz  $E \in \mathbb{R}^{|vocab| \times d}$  donde cada fila corresponde a una palabra diferente en el vocabulario. La operación de búsqueda es simplemente una indexación:  $v_{1249} = E_{[1249,:]}$ . Si la característica simbólica se codifica como un vector one-hot  $\vec{x}$ , la operación de búsqueda se puede implementar como una multiplicación de matriz-vector  $\vec{x}E$ . Los vectores de embedding se combinan antes de pasar a la siguiente capa. Las operaciones comunes de combinación son concatenación, suma y promedio. Una matriz de embeddings de palabras  $E$  se puede inicializar con vectores de palabras preentrenados a partir de documentos no etiquetados utilizando métodos específicos basados en la hipótesis distribucional, como los implementados en Word2Vec (que se discutirán más adelante en el curso).

One-hot-encoded word vector	Embedding Matrix
$\vec{x} = [0, 0, \dots, 1, \dots 0]^{\top \times  V }$ 	$E = \begin{bmatrix} -1.8 & 2.3 & \dots & 3.1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 3.3 & -2.1 & \dots & 4.6 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 4.2 & 1.9 & \dots & -3.3 \end{bmatrix} \leftarrow \begin{array}{l} \text{abduct} \\ \text{dog} \\ \text{zumba} \end{array}$

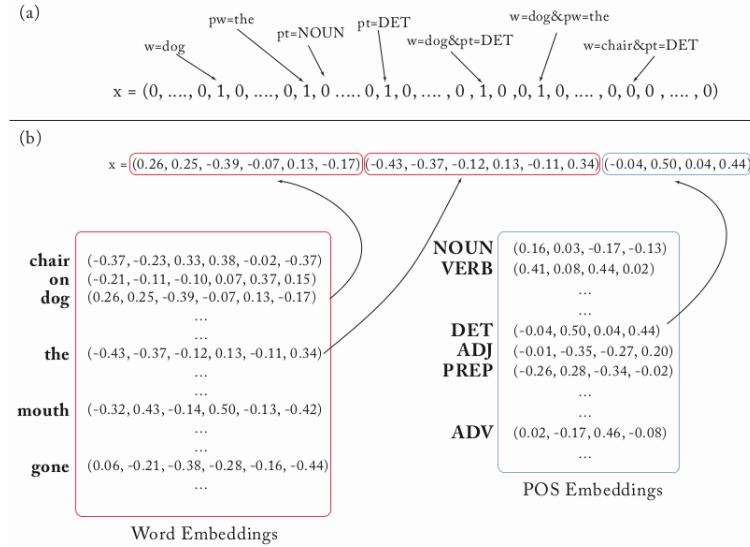
$$\vec{x}E = [3.3, -2.1, \dots, 4.6]$$

#### 6.4.1. Vectores Densos vs Representaciones One-hot

¿Cuáles son los beneficios de representar nuestras características como vectores en lugar de como identificadores únicos? ¿Deberíamos siempre representar las características como vectores densos? Consideremos los dos tipos de representaciones.

1. **One Hot:** cada característica es su propia dimensión.
  - La dimensionalidad del vector one-hot es igual al número de características distintas.
  - Las características son completamente independientes entre sí. La característica "la palabra es 'perro'" es tan diferente de "la palabra es 'pensando'" como lo es de "la palabra es 'gato'".
2. **Dense:** cada característica es un vector de  $d$  dimensiones.
  - La dimensionalidad del vector es  $d$ .

- El entrenamiento del modelo hará que características similares tengan vectores similares: la información se comparte entre características similares.



**Ejemplo: Vectores Densos vs Representaciones One-hot** La figura anterior muestra dos codificaciones de la información: la palabra actual es "perro"; la palabra anterior es ".el"; la etiqueta POS anterior es "DET".

(a) Vector de características dispersas:

- Cada dimensión representa una característica.
- Las combinaciones de características tienen sus propias dimensiones.
- Los valores de las características son binarios.
- La dimensionalidad es muy alta.

(b) Vector de características densas basado en embeddings.

- Cada característica principal se representa como un vector.
- Cada característica se corresponde con varias entradas del vector de entrada.
- No hay una codificación explícita de combinaciones de características.
- La dimensionalidad es baja.
- Los mapeos de características a vectores provienen de una tabla de embeddings.

Un beneficio de usar vectores densos y de baja dimensionalidad es computacional: la mayoría de las bibliotecas de redes neuronales no funcionan bien con vectores dispersos de alta dimensionalidad. Sin embargo, este es solo un obstáculo técnico que se puede resolver con cierto esfuerzo de ingeniería.

El principal beneficio de las representaciones densas radica en el poder de generalización. Si creemos que algunas características pueden proporcionar pistas similares, vale la pena proporcionar una representación que pueda capturar estas similitudes. Supongamos que hemos observado la palabra "perro" muchas veces durante el entrenamiento, pero solo hemos observado la palabra "gato" pocas veces. Si cada una de las palabras se asocia con su propia dimensión (one-hot), las ocurrencias de "perro" no nos dirán nada sobre las ocurrencias de "gato". Sin embargo, en la representación de vectores densos, el vector aprendido para "perro" puede ser similar al vector aprendido para "gato". Esto permitirá que el modelo comparta fuerza estadística entre los dos eventos. Este argumento asume que hemos visto suficientes ocurrencias de la palabra "gato" como para que su vector sea similar al de "perro". Los vectores de palabras preentrenados (por ejemplo, Word2Vec, GloVe), que se discutirán más adelante en el curso, se pueden utilizar para obtener vectores densos a partir de texto no anotado.

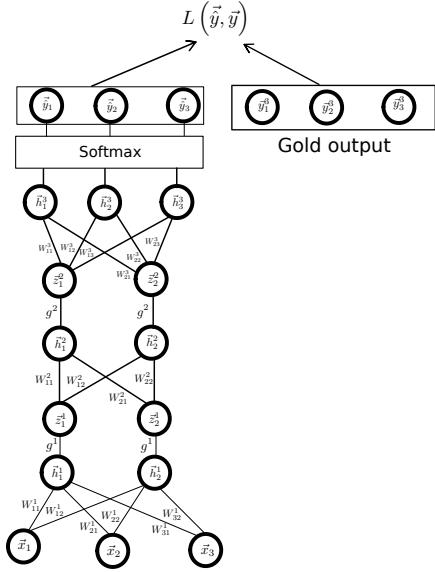
## 6.5. Entrenamiento de Redes Neuronales

Las redes neuronales se entranan de la misma manera que los modelos lineales. La salida de la red se utiliza para calcular una función de pérdida  $L(\hat{y}, y)$  que se minimiza en todos los ejemplos de entrenamiento utilizando descenso de gradiente. El algoritmo de retropropagación es una técnica eficiente para evaluar el gradiente de una función de pérdida  $L$  en una red neuronal de alimentación directa con respecto a todos sus parámetros (Bishop, 2006). Los parámetros de la red incluyen  $W^1, \vec{b}^1, \dots, W^m, \vec{b}^m$  para una red de  $m$  capas. Cabe destacar que los superíndices se utilizan para denotar los índices de las capas (no exponentiación). Para simplificar, asumiremos que  $L$  se calcula sobre un solo ejemplo. El desafío radica en que en las redes neuronales el número de parámetros puede ser enorme y necesitamos una forma eficiente de calcular los gradientes. La idea es aplicar la regla de la cadena de derivadas de manera inteligente.

## 6.6. Recordatorio de la Regla de la Cadena en Derivadas

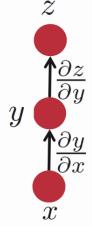
La regla de la cadena simple establece que si  $z = f(y)$  y  $y = g(x)$ , entonces

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial z}{\partial y} \times \frac{\partial y}{\partial x}$$



Por ejemplo, si  $z = e^y$  y  $y = 2x$ , entonces

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial z}{\partial y} \times \frac{\partial y}{\partial x} = e^y \times 2 = 2e^{2x}$$



La regla de la cadena múltiple establece que si  $z = f(y_1, y_2)$ ,  $y_1 = g_1(x)$  y  $y_2 = g_2(x)$ , entonces

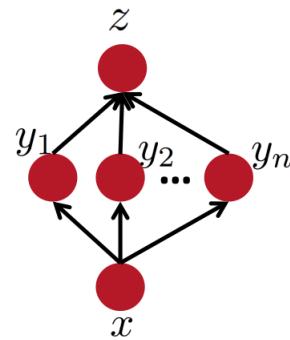
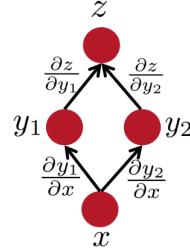
$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial z}{\partial y_1} \times \frac{\partial y_1}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial y_2} \times \frac{\partial y_2}{\partial x}$$

Por ejemplo, si  $z = e^{y_1 \times y_2}$ ,  $y_1 = 2x$  y  $y_2 = x^2$ , entonces

$$\frac{\partial z}{\partial x} = (e^{y_1 \times y_2} \times y_2) \times 2 + (e^{y_1 \times y_2} \times y_1) \times 2x = e^{2x^3} \times 6x^2$$

La versión general de la regla de la cadena múltiple es:

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial z}{\partial y_i} \times \frac{\partial y_i}{\partial x}$$



## 6.7. Retroproyagación

En una red de alimentación directa general, cada unidad calcula una suma ponderada de sus entradas de la siguiente forma:

$$\vec{h}_{[j]}^l = \left( \sum_i W_{[i,j]}^l \times \vec{z}_{[i]}^{(l-1)} \right) + \vec{b}_{[j]}^l \quad (6.3)$$

La variable  $\vec{z}_{[i]}^{(l-1)}$  es una entrada que envía una conexión a la unidad  $\vec{h}_{[j]}^l$ ,  $W_{[i,j]}^l$  es el peso asociado con esa conexión, y  $l$  es el índice de la capa.

Los vectores de sesgo  $\vec{b}_{[j]}$  pueden excluirse de (eq. 6.3) e incluirse en la matriz de pesos  $W_{[i,j]}^l$  al introducir una unidad adicional, o entrada, con una activación fija de +1.

Las entradas en la capa  $l$ ,  $\vec{z}_{[i]}^{(l-1)}$ , son el resultado de aplicar la función de activación  $g$  a las unidades de la capa anterior:

$$\vec{z}_{[j]}^l = g(\vec{h}_{[j]}^l) \quad (6.4)$$

Para la capa de entrada ( $l = 0$ ),  $\vec{z}$  corresponde al vector de entrada  $\vec{z} = \vec{x}$ :

$$\vec{z}_{[j]}^0 = \vec{x}_{[j]} \quad (6.5)$$

Para cada instancia en el conjunto de entrenamiento, proporcionamos el vector de entrada correspondiente  $\vec{x}$  a la red. Luego calculamos las activaciones de todas las unidades ocultas y de salida en la red mediante la aplicación sucesiva de (eq. 6.3) y (eq. 6.4).

Este proceso a menudo se denomina propagación hacia adelante porque se puede considerar como un flujo de información hacia adelante a través de la red.

Ahora consideremos la evaluación de la derivada de  $L$  con respecto a un peso  $W_{[i,j]}^l$ .

Suponiendo que la pérdida  $L$  se calcula sobre un solo ejemplo, podemos observar que  $L$  depende del peso  $W_{[i,j]}^l$  únicamente a través de la suma de las entradas  $\vec{h}_{[j]}^l$ .

Por lo tanto, podemos aplicar la regla de la cadena para derivadas parciales para obtener:

$$\frac{\partial L}{\partial W_{[i,j]}^l} = \frac{\partial L}{\partial \vec{h}_{[j]}^l} \times \frac{\partial \vec{h}_{[j]}^l}{\partial W_{[i,j]}^l} \quad (6.6)$$

Ahora introducimos una notación útil:

$$\vec{\delta}_{[j]}^l \equiv \frac{\partial L}{\partial \vec{h}_{[j]}^l} \quad (6.7)$$

Usando (6.3), podemos escribir

$$\frac{\partial \vec{h}_{[j]}^l}{\partial W_{[i,j]}^l} = \vec{z}_{[i]}^{(l-1)} \quad (6.8)$$

Sustituyendo (6.7) y (6.8) en (6.6), obtenemos

$$\frac{\partial L}{\partial W_{[i,j]}^l} = \vec{\delta}_{[j]}^l \times \vec{z}_{[i]}^{(l-1)} \quad (6.9)$$

La ecuación (6.9) nos dice que la derivada requerida se obtiene simplemente multiplicando el valor de  $\vec{\delta}_{[j]}^l$  por el valor de  $\vec{z}_{[i]}^{(l-1)}$ .

Por lo tanto, para evaluar las derivadas, solo necesitamos calcular el valor de  $\vec{\delta}_{[j]}^l$  para cada unidad oculta y de salida en la red, y luego aplicar (6.9) para actualizar los pesos de la red. Este proceso se conoce como retropropagación, ya que el cálculo del gradiente se propaga hacia atrás a través de la red.

Calcular  $\vec{\delta}_{[j]}^m$  para las unidades de salida ( $l = m$ ) suele ser directo, ya que las unidades de activación  $\vec{h}_{[j]}^m$  se observan directamente en la expresión de pérdida.

Lo mismo se aplica a los modelos lineales poco profundos.

Para evaluar  $\vec{\delta}_{[j]}^l$  para las unidades ocultas, nuevamente hacemos uso de la regla de la cadena para derivadas parciales:

$$\vec{\delta}_{[j]}^l \equiv \frac{\partial L}{\partial \vec{h}_{[j]}^l} = \sum_k \left( \frac{\partial L}{\partial \vec{h}_{[k]}^{l+1}} \times \frac{\partial \vec{h}_{[k]}^{l+1}}{\partial \vec{h}_{[j]}^l} \right) \quad (6.10)$$

La suma se realiza sobre todas las unidades  $\vec{h}_{[k]}^{l+1}$  a las que la unidad  $\vec{h}_{[j]}^l$  envía conexiones.

Suponemos que las conexiones se realizan solo entre capas consecutivas en la red (desde la capa  $l$  hasta la capa  $(l+1)$ ).

Las unidades  $\vec{h}_{[k]}^{l+1}$  podrían incluir otras unidades ocultas y/o unidades de salida.

Si ahora sustituimos la definición de  $\vec{\delta}_{[j]}^l$  dada por la ecuación (6.7) en la ecuación (6.10), obtenemos:

$$\vec{\delta}_{[j]}^l \equiv \frac{\partial L}{\partial \vec{h}_{[j]}^l} = \sum_k \left( \vec{\delta}_{[k]}^{(l+1)} \times \frac{\partial \vec{h}_{[k]}^{l+1}}{\partial \vec{h}_{[j]}^l} \right) \quad (6.11)$$

Ahora, para la expresión  $\vec{h}_{[k]}^{l+1}$  podemos ir a su definición (ecuación 6.3):

$$\vec{h}_{[k]}^{(l+1)} = \left( \sum_i W_{[i,k]}^{l+1} \times \vec{z}_{[i]}^l \right) + \vec{b}_{[k]}^{(l+1)}$$

Reemplazando ahora la ecuación (6.4) ( $\vec{z}_{[i]}^l = g(\vec{h}_{[i]}^l)$ ) en la ecuación anterior, obtenemos:

$$\vec{h}_{[k]}^{(l+1)} = \left( \sum_i W_{[i,k]}^{l+1} \times g(\vec{h}_{[i]}^l) \right) + \vec{b}_{[k]}^{(l+1)}$$

Al calcular  $\frac{\partial \vec{h}_{[k]}^{l+1}}{\partial \vec{h}_{[j]}^l}$ , todos los términos en la suma donde  $i \neq j$  se cancelan.

Por lo tanto, tenemos:

$$\frac{\partial \vec{h}_{[k]}^{l+1}}{\partial \vec{h}_{[j]}^l} = W_{[j,k]}^{l+1} \times g'(\vec{h}_{[j]}^l) \quad (6.12)$$

Sustituyendo la ecuación (6.12) en la ecuación (6.11), obtenemos:

$$\vec{\delta}_{[j]}^l \equiv \frac{\partial L}{\partial \vec{h}_{[j]}^l} = \sum_k \left( \vec{\delta}_{[k]}^{(l+1)} \times W_{[j,k]}^{l+1} \times g'(\vec{h}_{[j]}^l) \right) \quad (6.13)$$

Dado que  $g'(\vec{h}_{[j]}^l)$  no depende de  $k$ , podemos obtener la siguiente fórmula de retropropagación:

$$\vec{\delta}_{[j]}^l = g'(\vec{h}_{[j]}^l) \times \sum_k \left( \vec{\delta}_{[k]}^{(l+1)} \times W_{[j,k]}^{l+1} \right) \quad (6.14)$$

Esto nos dice que el valor de  $\vec{\delta}$  para una unidad oculta en particular se puede obtener propagando los  $\vec{\delta}$  hacia atrás desde las unidades superiores en la red [Bishop, 2006].

El procedimiento de retropropagación se puede resumir de la siguiente manera:

1. Aplicar un vector de entrada  $\vec{x}$  a la red y propagarlo hacia adelante a través de la red utilizando las ecuaciones (6.3) y (6.4) para encontrar las activaciones de todas las unidades ocultas y de salida.
2. Calcular  $\vec{\delta}_{[j]}^m$  para todas las unidades de salida (recordar que las derivadas involucradas aquí son fáciles de calcular).
3. Retropropagar los  $\vec{\delta}_{[k]}^{(l+1)}$  utilizando la ecuación (6.14) para obtener  $\vec{\delta}_{[j]}^l$  para cada unidad oculta en la red. Se realiza de capas superiores a capas inferiores en la red.
4. Utilizar la ecuación (6.9) ( $\frac{\partial L}{\partial W_{[i,j]}} = \vec{\delta}_{[j]}^l \times \vec{z}_{[i]}^{(l-1)}$ ) para evaluar las derivadas requeridas.

## 6.8. La Abstracción del Grafo de Cómputo

Uno puede calcular los gradientes de los varios parámetros de una red a mano e implementarlos en código. Sin embargo, este procedimiento es engorroso y propenso a errores. Por lo tanto, para la mayoría de los propósitos, es preferible utilizar herramientas automáticas para el cálculo de gradientes [Bengio, 2012].

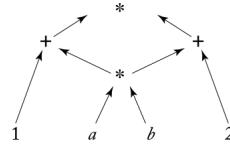
Una representación de una computación matemática arbitraria (por ejemplo, una red neuronal) como un grafo es llamada un grafo de cómputo. Esta abstracción nos permite calcular los gradientes para cualquier tipo de arquitectura de red neuronal utilizando el algoritmo de retropropagación. La formulación anterior estaba restringida a redes feedforward.

Un grafo de cómputo es un grafo dirigido acíclico (DAG, por sus siglas en inglés). Los nodos corresponden a operaciones matemáticas o variables (ligadas), y las aristas corresponden al flujo de valores intermedios entre los nodos. La estructura del grafo define el orden de la computación en términos de las dependencias entre los diferentes componentes. Dado que el resultado de una operación puede ser la entrada de varias continuaciones, el grafo es un DAG y no un árbol.

Consideremos, por ejemplo, un grafo para el cálculo de  $(a * b + 1) * (a * b + 2)$ :

La computación de  $a * b$  es compartida. Dado que una red neuronal es esencialmente una expresión matemática, se puede representar como un grafo de cómputo.

La figura anterior muestra el grafo de cómputo para una MLP con una capa oculta y una transformación de salida softmax [Goldberg, 2017]. Los nodos



ovalados representan operaciones matemáticas o funciones, y los nodos rectangulares sombreados representan parámetros (variables ligadas). Las entradas de la red se tratan como constantes y se dibujan sin un nodo circundante. Los nodos de entrada y parámetros no tienen aristas de entrada, y los nodos de salida no tienen aristas de salida. La salida de cada nodo es una matriz, cuya dimensionalidad se indica sobre el nodo.

Este grafo es incompleto: sin especificar las entradas, no podemos calcular una salida. La figura 5.1b muestra un grafo completo para una MLP que toma tres palabras como entradas y predice la distribución de etiquetas gramaticales para la tercera palabra. Este grafo se puede utilizar para la predicción, pero no para el entrenamiento, ya que la salida es un vector (no un escalar) y el grafo no tiene en cuenta la respuesta correcta ni el término de pérdida. Finalmente, el grafo en la figura 5.1c muestra el grafo de cómputo para un ejemplo de entrenamiento específico, en el cual las entradas son las (incrustaciones de) las palabras "the", "black", "dog", y la salida esperada es "NOUN" (cuyo índice es 5). El nodo de selección implementa una operación de indexación, recibiendo un vector y un índice (en este caso, 5) y devolviendo la entrada correspondiente en el vector.

### 6.8.1. Cómputo hacia Adelante

El paso hacia adelante (forward pass) calcula las salidas de los nodos en el grafo. Dado que la salida de cada nodo depende únicamente de sí mismo y de las aristas entrantes, es trivial calcular las salidas de todos los nodos.

Esto se hace recorriendo los nodos en un orden topológico y calculando la salida de cada nodo dado que las salidas de sus predecesores ya han sido calculadas.

Más formalmente, en un grafo de  $N$  nodos, asociamos a cada nodo un índice  $i$  de acuerdo con su orden topológico. Sea  $f_i$  la función calculada por el nodo  $i$  (por ejemplo, multiplicación, suma, etc.). Sea  $\pi(i)$  los nodos padres del nodo  $i$ , y  $\pi^{-1}(i) = \{j | i \in \pi(j)\}$  los nodos hijos del nodo  $i$  (estos son los argumentos de  $f_i$ ). Denotemos por  $v(i)$  la salida del nodo  $i$ , es decir, la aplicación de  $f_i$  a los valores de salida de sus argumentos  $\pi^{-1}(i)$ . Para los nodos de variables e entrada,  $f_i$  es una función constante y  $\pi^{-1}(i)$  está vacío. El paso hacia adelante en el grafo de cómputo calcula los valores  $v(i)$  para todos los  $i \in [1, N]$ .

---

**Algorithm 5.3** Computation graph forward pass.

---

```
1: for  $i = 1$  to  $N$  do
2:   Let  $a_1, \dots, a_m = \pi^{-1}(i)$ 
3:    $v(i) \leftarrow f_i(v(a_1), \dots, v(a_m))$ 
```

---

### 6.8.2. Cómputo hacia Atrás (Retropropagación)

El paso hacia atrás (backward pass) comienza designando un nodo  $N$  con una salida escalar ( $1 \times 1$ ) como nodo de pérdida y ejecutando el cómputo hacia adelante hasta ese nodo.

El cómputo hacia atrás calcula los gradientes de los parámetros con respecto al valor de ese nodo.

Denotemos por  $d(i)$  la cantidad  $\frac{\partial N}{\partial i}$ . El algoritmo de retropropagación se utiliza para calcular los valores  $d(i)$  para todos los nodos  $i$ .

El paso hacia atrás llena una tabla de valores  $d(1), \dots, d(N)$  como se muestra en el siguiente algoritmo.

---

**Algorithm 5.4** Computation graph backward pass (backpropagation).

---

```
1:  $d(N) \leftarrow 1$   $\frac{\partial N}{\partial N} = 1$ 
2: for  $i = N-1$  to  $1$  do
3:    $d(i) \leftarrow \sum_{j \in \pi(i)} d(j) \cdot \frac{\partial f_j}{\partial i}$   $\frac{\partial N}{\partial i} = \sum_{j \in \pi(i)} \frac{\partial N}{\partial j} \frac{\partial j}{\partial i}$ 
```

---

El algoritmo de retropropagación sigue esencialmente la regla de la cadena de la diferenciación. La cantidad  $\frac{\partial f_j}{\partial i}$  es la derivada parcial de  $f_j(\pi^{-1}(j))$  con respecto al argumento  $i \in \pi^{-1}(j)$ . Este valor depende de la función  $f_j$  y los valores  $v(a_1), \dots, v(a_m)$  (donde  $a_1, \dots, a_m = \pi^{-1}(j)$ ) de sus argumentos, los cuales fueron calculados en el paso hacia adelante.

Por lo tanto, para definir un nuevo tipo de nodo, es necesario definir dos métodos: uno para calcular el valor hacia adelante  $v(i)$  basado en las entradas del nodo, y otro para calcular  $\frac{\partial f_j}{\partial i}$  para cada  $x \in \pi^{-1}(i)$ .

### 6.8.3. Resumen de la Abstracción del Grafo de Cómputo

Observa que la formulación anterior de la retropropagación es equivalente a la dada anteriormente en clase.

La abstracción del grafo de cómputo nos permite:

1. Construir fácilmente redes arbitrarias.
2. Evaluar sus predicciones para entradas dadas (paso hacia adelante).
3. Calcular gradientes para sus parámetros con respecto a pérdidas escalares arbitrarias (paso hacia atrás o retropropagación).

Una propiedad interesante de la abstracción del grafo de cómputo es que nos permite calcular los gradientes para redes arbitrarias (por ejemplo, redes con conexiones saltadas, pesos compartidos, funciones de pérdida especiales, etc.).

#### 6.8.4. Derivadas de funciones no matemáticas

Definir  $\frac{\partial f_j}{\partial i}$  para funciones matemáticas como  $\log$  o  $+$  es sencillo.

Puede resultar desafiante pensar en la derivada de operaciones como  $\text{pick}(\vec{x}, 5)$ , que selecciona el quinto elemento de un vector.

La respuesta es pensar en términos de la contribución al cálculo. Después de seleccionar el elemento  $i$ -ésimo de un vector, solo ese elemento participa en el resto del cálculo.

Por lo tanto, el gradiente de  $\text{pick}(\vec{x}, 5)$  es un vector  $\vec{v}$  con la dimensionalidad de  $\vec{x}$  donde  $\vec{v}_{[5]} = 1$  y  $\vec{v}_{[i \neq 5]} = 0$ .

De manera similar, para la función  $\max(0, x)$ , el valor del gradiente es 1 para  $x > 0$  y 0 en caso contrario.

### 6.9. Regularización y Dropout

Las redes de múltiples capas pueden ser grandes y tener muchos parámetros, lo que las hace especialmente propensas al sobreajuste.

La regularización del modelo es tan importante en las redes neuronales profundas como lo es en los modelos lineales, tal vez incluso más.

Las regularizaciones discutidas para modelos lineales, es decir,  $L_2$ ,  $L_1$  y la elastic-net, también son relevantes para las redes neuronales.

Otra técnica efectiva para evitar que las redes neuronales sobreajusten los datos de entrenamiento es el **dropout training** [Srivastava et al., 2014].

El método de dropout está diseñado para evitar que la red aprenda a depender de unidades o conexiones específicas en el proceso de entrenamiento, lo que ayuda a reducir el sobreajuste.

La idea básica detrás del dropout es apagar aleatoriamente unidades (neuronas) en cada paso de entrenamiento, lo que hace que la red aprenda a ser más robusta y generalice mejor.

El dropout se puede aplicar a las unidades ocultas (neuronas) y/o a las conexiones entre ellas.

Durante el entrenamiento, en cada paso, se aplica una máscara binaria aleatoria a las unidades o conexiones seleccionadas para el dropout. Las unidades o conexiones que están <sup>a</sup>"pagadas" tienen un valor de cero y no contribuyen al cálculo hacia adelante ni hacia atrás. Solo las unidades o conexiones <sup>er</sup>"cendidas" se utilizan en el cálculo de la predicción y en la retropropagación del error.

---

<sup>a</sup>Un tutorial completo sobre el algoritmo de retropropagación sobre la abstracción del grafo de cómputo se puede encontrar aquí: <https://colah.github.io/posts/2015-08-Backprop/>.

Durante la inferencia o evaluación, no se aplica el dropout y todas las unidades o conexiones se utilizan para realizar la predicción.

Es importante destacar que el dropout no es una técnica exclusiva de las redes neuronales, pero ha demostrado ser especialmente efectiva en este contexto debido a la gran cantidad de parámetros y conexiones que suelen tener las redes neuronales profundas.

El valor típico para la tasa de dropout, es decir, la fracción de unidades o conexiones que se apagan en cada paso de entrenamiento, suele ser del orden del 0.2 al 0.5. Sin embargo, el valor óptimo puede variar según el problema y la arquitectura de la red. Por lo tanto, es recomendable experimentar con diferentes tasas de dropout para encontrar la mejor configuración para cada caso.

En resumen, la regularización y el dropout son técnicas efectivas para evitar el sobreajuste en las redes neuronales. Al utilizar regularización, como  $L_2$  o  $L_1$ , se penalizan los grandes valores de los parámetros, lo que ayuda a controlar la complejidad del modelo. El dropout, por otro lado, apaga aleatoriamente unidades o conexiones durante el entrenamiento, lo que promueve la robustez y generalización del modelo. Ambas técnicas pueden utilizarse en conjunto para obtener mejores resultados en la generalización y evitar el sobreajuste.

## 6.10. Frameworks de Aprendizaje Profundo

Existen varios paquetes de software que implementan el modelo de grafo de cómputo. Todos estos paquetes admiten todos los componentes esenciales (tipos de nodos) para definir una amplia gama de arquitecturas de redes neuronales.

Uno de estos paquetes es **TensorFlow** (<https://www.tensorflow.org/>), una biblioteca de software de código abierto para cálculos numéricos utilizando gráficos de flujo de datos, desarrollada originalmente por el equipo de Google Brain.

Otro paquete popular es **Keras**, que es una API de alto nivel para redes neuronales que se ejecuta sobre TensorFlow y otros backends (<https://keras.io/>).

También tenemos **PyTorch**, una biblioteca de aprendizaje automático de código abierto para Python basada en Torch, desarrollada por el grupo de investigación de inteligencia artificial de Facebook. PyTorch admite la construcción de gráficos dinámicos, lo que significa que se crea un grafo de cómputo diferente desde cero para cada muestra de entrenamiento (<https://pytorch.org/>).



## Capítulo 7

# Vectores de Palabra

Un componente importante en las redes neuronales para el lenguaje es el uso de una capa de embedding. Se trata de una asignación de símbolos discretos a vectores continuos. Cuando se realiza el embedding de palabras, estas pasan de ser símbolos distintos y aislados a objetos matemáticos en los que se puede operar. La distancia entre vectores puede equiparse a la distancia entre palabras. Esto facilita generalizar el comportamiento de una palabra a otra.

### 7.1. Hipótesis Distribucional y Matrices Palabra Contexto

La **hipótesis distribucional** [Harris, 1954] establece que las palabras que ocurren en los mismos **contextos** tienden a tener significados similares. O, en otras palabras, una palabra se caracteriza por las compañías que mantiene". Las **representaciones distribucionales** representan las palabras mediante **vectores de alta dimensionalidad** basados en los contextos en los que ocurren.

Los vectores distribucionales se construyen a partir de matrices de palabras-contexto  $M$ . Cada celda  $(i, j)$  es un valor de asociación basado en la co-ocurrencia entre una **palabra objetivo**  $w_i$  y un **contexto**  $c_j$ , calculado a partir de un corpus de documentos. Los contextos se definen comúnmente como ventanas de palabras que rodean a  $w_i$ . La longitud de la ventana  $k$  es un parámetro que va desde 1 hasta 8 palabras en ambos lados de  $w_i$ . Si el vocabulario de las palabras objetivo y las palabras de contexto es el mismo,  $M$  tiene una dimensionalidad de  $|\mathcal{V}| \times |\mathcal{V}|$ . Mientras que las ventanas más cortas capturan información sintáctica (por ejemplo, POS), las ventanas más largas capturan más probabilidades de similitud temática [Goldberg, 2016, Jurafsky and Martin, 2023].

Ejemplo: Vectores de Distribución con ventanas contextuales de tamaño 1

Las asociaciones entre palabras y contextos se pueden calcular utilizando diferentes enfoques:

1. Recuento de co-ocurrencias.

### Example corpus:

- I like deep learning.
- I like NLP.
- I enjoy flying.

counts	I	like	enjoy	deep	learning	NLP	flying	.
I	0	2	1	0	0	0	0	0
like	2	0	0	1	0	1	0	0
enjoy	1	0	0	0	0	0	1	0
deep	0	1	0	0	1	0	0	0
learning	0	0	0	1	0	0	0	1
NLP	0	1	0	0	0	0	0	1
flying	0	0	1	0	0	0	0	1
.	0	0	0	0	1	1	1	0

Figura 7.1: Ejemplo tomado de: <http://cs224d.stanford.edu/lectures/CS224d-Lecture2.pdf>

2. Información mutua puntual positiva (PPMI, por sus siglas en inglés).
3. Valores de significancia de una prueba t emparejada.

Según [Jurafsky and Martin, 2023], el más común de estos enfoques es PPMI. Los métodos de distribución también se conocen como métodos basados en conteo.

## 7.2. PPMI

PPMI calcula el logaritmo de la probabilidad de que los pares palabra-contexto ocurran juntos en comparación con la probabilidad de que sean independientes.

$$\text{PMI}(w, c) = \log_2 \left( \frac{P(w, c)}{P(w)P(c)} \right) = \log_2 \left( \frac{\text{count}(w, c) \times |D|}{\text{count}(w) \times \text{count}(c)} \right) \quad (7.1)$$

Los valores de PMI negativos sugieren que la pareja ocurre menos a menudo de lo esperado por azar. Estas estimaciones no son confiables a menos que los conteos se calculen a partir de corpus muy grandes [Jurafsky and Martin, 2023]. PPMI corrige este problema reemplazando los valores negativos por cero.

$$\text{PPMI}(w, c) = \max(0, \text{PMI}(w, c)) \quad (7.2)$$

Los vectores distribuidos o word embeddings son vectores continuos de palabras de baja dimensionalidad que se entrena a partir de corpus de documentos utilizando redes neuronales. El tamaño de los vectores de distribución

basados en recuento aumenta con el vocabulario, es decir, pueden tener una dimensionalidad muy alta. Almacenar explícitamente la matriz de co-ocurrencia puede requerir mucha memoria. Algunos modelos de clasificación no escalan bien con datos de alta dimensionalidad. La comunidad de redes neuronales prefiere utilizar representaciones **distribuidas**<sup>1</sup> o **word embeddings**. Los word embeddings son vectores densos de palabras de baja dimensionalidad que se entranan a partir de corpus de documentos utilizando redes neuronales. Las dimensiones no son directamente interpretables, es decir, representan características latentes de la palabra, capturando esperanzadamente propiedades sintácticas y semánticas útiles" [Turian et al., 2010]. Se han convertido en un componente crucial de las arquitecturas de redes neuronales para el procesamiento del lenguaje natural.

Existen dos enfoques principales para obtener word embeddings:

1. Capas de embedding: utilizando una capa de embedding en una arquitectura de red neuronal específica para una tarea, entrenada a partir de ejemplos etiquetados (por ejemplo, análisis de sentimientos).
2. Word embeddings pre-entrenados: creando una tarea predictiva auxiliar a partir de corpus no etiquetados (por ejemplo, predecir la siguiente palabra) en la que los word embeddings surgen naturalmente a partir de la arquitectura de la red neuronal.

Estos enfoques también se pueden combinar: se puede inicializar una capa de embedding de una red neuronal específica para una tarea con word embeddings pre-entrenados obtenidos mediante el segundo enfoque. Los modelos más populares basados en el segundo enfoque son skip-gram [Mikolov et al., 2013], continuous bag-of-words [Mikolov et al., 2013] y GloVe [Pennington et al., 2014]. Los word embeddings han demostrado ser más poderosos que los enfoques distribucionales en muchas tareas de procesamiento del lenguaje natural [Baroni et al., 2014]. En [Amir et al., 2015], se utilizaron como características en un modelo de regresión para determinar la asociación entre palabras de Twitter y sentimientos positivos.

### 7.3. Word2Vec

Word2Vec es un paquete de software que implementa dos arquitecturas de redes neuronales para entrenar word embeddings: Continuous Bag of Words (CBOW) y Skip-gram. Implementa dos modelos de optimización: Muestreo Negativo (Negative Sampling) y Softmax Jerárquico (Hierarchical Softmax). Estos modelos son redes neuronales poco profundas que se entranan para predecir los contextos de las palabras. Se puede encontrar un tutorial muy completo sobre los algoritmos detrás de Word2Vec en <https://arxiv.org/pdf/1411.2738.pdf>.

---

<sup>1</sup>Idea: El significado de la palabra está "distribuido" en una combinación de dimensiones.

El modelo Skip-gram entrena una red neuronal con una capa oculta para predecir las palabras que rodean a una palabra central, dentro de una ventana de tamaño  $k$  que se desplaza a lo largo del corpus de entrada. La palabra central y las  $k$  palabras circundantes corresponden a las capas de entrada y salida de la red. Inicialmente, las palabras se representan mediante vectores one-hot: vectores del tamaño del vocabulario ( $|V|$ ) con valores cero en todas las entradas excepto en el índice correspondiente a la palabra, que recibe un valor de 1.

La capa de salida combina los  $k$  vectores one-hot de las palabras circundantes. La capa oculta tiene una dimensionalidad  $d$ , que determina el tamaño de los embeddings (normalmente  $d \ll |V|$ ).

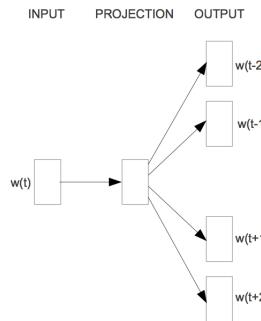


Figura 7.2: Imagen tomada del artículo original

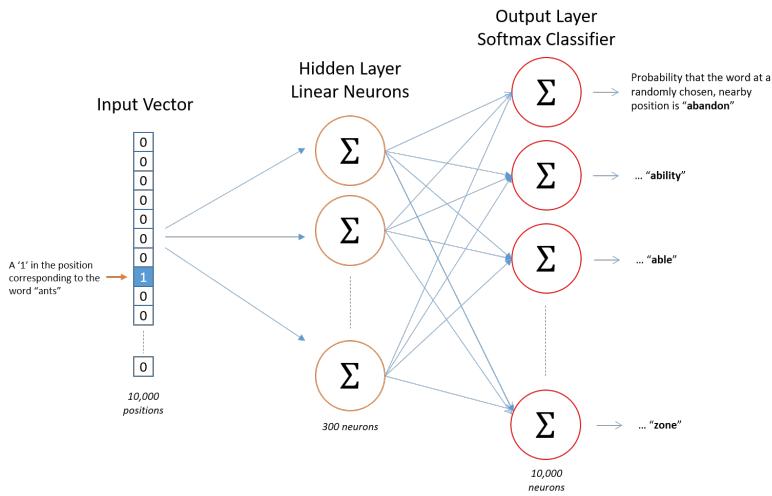


Figura 7.3: Imagen tomada de: <http://mccormickml.com/2016/04/19/word2vec-tutorial-the-skip-gram-model/>

El modelo Skip-gram utiliza un softmax jerárquico donde el vocabulario se representa como un árbol binario de Huffman. Esto se basa en observaciones anteriores de que la frecuencia de las palabras funciona bien para obtener clases en modelos de lenguaje basados en redes neuronales. Los árboles de Huffman asignan códigos binarios cortos a palabras frecuentes, lo que reduce aún más el número de unidades de salida que deben evaluarse.

Si dos palabras diferentes tienen contextos muy similares (es decir, qué palabras es probable que aparezcan a su alrededor), entonces nuestro modelo necesita generar resultados muy similares para estas dos palabras. Y una forma de lograr que la red genere predicciones de contexto similares para estas dos palabras es si los vectores de palabras son similares. Por lo tanto, si dos palabras tienen contextos similares, ¡nuestra red estará motivada a aprender vectores de palabras similares para estas dos palabras! ¡Ta-da!

¿Y qué significa que dos palabras tengan contextos similares? Creo que se podría esperar que sinónimos como "inteligentez" y "stuto" tengan contextos muy similares. O que palabras relacionadas, como "motor" y "transmisión", probablemente también tengan contextos similares.

### 7.3.1. Parametrización del modelo Skip-gram

Se nos proporciona un corpus de entrada formado por una secuencia de palabras  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_T$  y un tamaño de ventana  $k$ .

Denotamos las palabras objetivo o centrales con la letra  $w$  y las palabras de contexto circundantes con la letra  $c$ .

La ventana de contexto  $c_{1:k}$  de la palabra  $w_t$  corresponde a las palabras  $w_{t-k/2}, \dots, w_{t-1}, w_{t+1}, \dots, w_{t+k/2}$  (asumiendo que  $k$  es un número par).

El objetivo del modelo Skip-gram es maximizar la log-probabilidad promedio de las palabras de contexto dadas las palabras objetivo:

$$\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sum_{c \in c_{1:k}} \log P(c|w_t)$$

La probabilidad condicional de una palabra de contexto  $c$  dada una palabra central  $w$  se modela con una softmax ( $C$  es el conjunto de todas las palabras de contexto, que generalmente es igual al vocabulario):

$$P(c|w) = \frac{e^{\vec{c} \cdot \vec{w}}}{\sum_{c' \in C} e^{\vec{c}' \cdot \vec{w}}}$$

Los parámetros del modelo  $\theta$  son  $\vec{c}$  y  $\vec{w}$  (representaciones vectoriales de los contextos y las palabras objetivo).

Sea  $D$  el conjunto de pares palabra-contexto correctos (es decir, pares de palabras que se observan en el corpus).

El objetivo de optimización es maximizar la log-verosimilitud condicional de los contextos  $c$  (lo cual es equivalente a minimizar la pérdida de entropía cruzada):

$$\arg \max_{\vec{c}, \vec{w}} \sum_{(w, c) \in D} \log P(c|w) = \sum_{(w, c) \in D} (\log e^{\vec{c} \cdot \vec{w}} - \log \sum_{c' \in C} e^{\vec{c}' \cdot \vec{w}}) \quad (7.3)$$

Suposición: maximizar esta función resultará en buenos embeddings  $\vec{w}$ , es decir, palabras similares tendrán vectores similares.

El término  $P(c|w)$  es computacionalmente costoso debido a la suma  $\sum_{c' \in C} e^{\vec{c}' \cdot \vec{w}}$  sobre todos los contextos  $c'$ .

Solución: reemplazar la softmax por una softmax jerárquica (el vocabulario se representa con un árbol binario de Huffman).

Los árboles de Huffman asignan códigos binarios cortos a palabras frecuentes, lo que reduce el número de unidades de salida que deben evaluarse.

La hipótesis de distribución establece que las palabras en contextos similares tienen significados similares. El objetivo anterior claramente trata de aumentar la cantidad de buenos pares palabra-contexto y disminuirla para los malos. Intuitivamente, esto significa que las palabras que comparten muchos contextos serán similares entre sí (también se observa que los contextos que comparten muchas palabras también serán similares entre sí). Sin embargo, esto es muy simplista.

Fuente: <https://arxiv.org/pdf/1402.3722.pdf>

El modelo Skip-gram y el Negative Sampling no son lo mismo.

### 7.3.2. Skip-gram con Negative Sampling

El Negative Sampling (NS) se presenta como un modelo más eficiente para calcular los embeddings del Skip-gram. Sin embargo, optimiza una función objetivo diferente [Goldberg and Levy, 2014].

El NS maximiza la probabilidad de que un par palabra-contexto  $(w, c)$  provenga del conjunto de pares palabra-contexto correctos  $D$  utilizando una función sigmoide:

$$P(D = 1|w, c_i) = \frac{1}{1 + e^{-\vec{w} \cdot \vec{c}_i}}$$

Suposición: las palabras de contexto  $c_i$  son independientes entre sí:

$$P(D = 1|w, c_{1:k}) = \prod_{i=1}^k P(D = 1|w, c_i) = \prod_{i=1}^k \frac{1}{1 + e^{-\vec{w} \cdot \vec{c}_i}}$$

Esto conduce a la siguiente función objetivo (log-verosimilitud):

$$\arg \max_{\vec{c}, \vec{w}} \log P(D = 1|w, c_{1:k}) = \sum_{i=1}^k \log \frac{1}{1 + e^{-\vec{w} \cdot \vec{c}_i}} \quad (7.4)$$

Esta función objetivo tiene una solución trivial si establecemos  $\vec{w}, \vec{c}$  de manera que  $P(D = 1|w, c) = 1$  para cada par  $(w, c)$  de  $D$ . Esto se logra estableciendo  $\vec{w} = \vec{c}$  y  $\vec{w} \cdot \vec{c} = K$  para todos los  $\vec{w}, \vec{c}$ , donde  $K$  es un número grande. Necesitamos un mecanismo que evite que todos los vectores tengan el mismo valor, al no permitir algunas combinaciones  $(w, c)$ . Una forma de hacerlo es presentarle al modelo algunos pares  $(w, c)$  para los cuales  $P(D = 1|w, c)$  debe ser bajo, es decir, pares que no están en los datos. Esto se logra muestreando ejemplos negativos de  $\tilde{D}$ . Se muestrean  $m$  palabras para cada par palabra-contexto  $(w, c) \in D$ . Se agrega cada palabra muestreada  $w_i$  junto con el contexto original  $c$  como un ejemplo negativo en  $\tilde{D}$ .  $\tilde{D}$  es  $m$  veces más grande que  $D$ . El número de ejemplos negativos  $m$  es un parámetro del algoritmo.

Función objetivo final:

$$\arg \max_{\vec{c}, \vec{w}} \sum_{(w, c) \in D} \log P(D = 1|w, c_{1:k}) + \sum_{(w, c) \in \tilde{D}} \log P(D = 0|w, c_{1:k}) \quad (7.5)$$

Las palabras negativas se muestrean a partir de una versión suavizada de las frecuencias del corpus:

$$\frac{\#(w)^{0,75}}{\sum_{w'} \#(w')^{0,75}}$$

Esto otorga más peso relativo a las palabras menos frecuentes.

### 7.3.3. Continuous Bag of Words: CBOW

Similar al modelo Skip-gram, pero ahora se predice la palabra central a partir del contexto circundante.

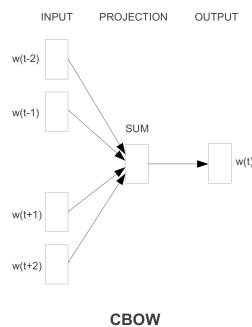


Figura 7.4: Imagen tomada de: <http://mccormickml.com/2016/04/19/word2vec-tutorial-the-skip-gram-model/>

### 7.3.4. GloVe

GloVe (de global vectors) es otro método popular para entrenar word embeddings [Pennington et al., 2014]. Construye una matriz explícita palabra-contexto y entrena los vectores de palabra y contexto  $\vec{w}$  y  $\vec{c}$  intentando satisfacer la siguiente ecuación:

$$\vec{w} \cdot \vec{c} + b_{[w]} + b_{[c]} = \log \#(w, c) \quad \forall (w, c) \in D \quad (7.6)$$

donde  $b_{[w]}$  y  $b_{[c]}$  son sesgos entrenados específicos de la palabra y el contexto.

En términos de factorización de matrices, si fijamos  $b_{[w]} = \log \#(w)$  y  $b_{[c]} = \log \#(c)$ , obtendremos un objetivo muy similar a la factorización de la matriz PMI palabra-contexto, desplazada por  $\log(|D|)$ . En GloVe, los parámetros de sesgo se aprenden y no se fijan, lo que le da otro grado de libertad.

El objetivo de optimización es la pérdida de mínimos cuadrados ponderada, asignando más peso a la reconstrucción correcta de elementos frecuentes.

Cuando se utiliza el mismo vocabulario de palabras y contextos, el modelo sugiere representar cada palabra como la suma de sus vectores de embedding de palabra y contexto correspondientes.

## 7.4. Analogías de palabras

Los word embeddings pueden capturar ciertas relaciones semánticas, como relaciones de género, tiempo verbal y país-capital entre palabras.

Por ejemplo, la siguiente relación se encuentra en los word embeddings entrenados con Word2Vec:  $\vec{w}_{king} - \vec{w}_{man} + \vec{w}_{woman} \approx \vec{w}_{queen}$ .

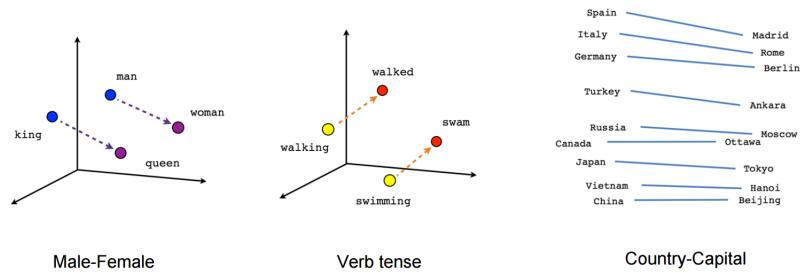


Figura 7.5: Fuente: <https://www.tensorflow.org/tutorials/embedding>

## 7.5. Evaluación

Existen muchos conjuntos de datos con asociaciones de palabras anotadas por humanos o analogías de oro que se pueden utilizar para evaluar algoritmos

de word embeddings.

Estos enfoques se llaman ".Enfoques de Evaluación Intrínseca".

La mayoría de ellos están implementados en: <https://github.com/kudkudak/word-embeddings-benchmarks>.

Los word embeddings también se pueden evaluar extrínsecamente utilizando en tareas externas de procesamiento del lenguaje natural (por ejemplo, etiquetado de partes del discurso, análisis de sentimientos).

## 7.6. Correspondencia entre modelos distribuidos y distribucionales

Tanto los métodos distribucionales "basados en recuento" como los distribuidos "neurales" se basan en la hipótesis de distribución.

Ambos intentan capturar la similitud entre palabras basándose en la similitud entre los contextos en los que ocurren.

Levy y Goldebrg mostraron en [Levy and Goldberg, 2014] que el modelo Skip-gram con negative sampling (SGNS) está factorizando implícitamente una matriz palabra-contexto, cuyas celdas son la información

mutua puntual (PMI) de los pares respectivos de palabra y contexto, desplazada por una constante global.

Esto vincula los métodos neuronales y los tradicionales "basados en recuento", sugiriendo que en un sentido profundo, las dos familias algorítmicas son equivalentes.

## 7.7. FastText

Los embeddings de FastText amplían el modelo skipgram teniendo en cuenta la estructura interna de las palabras mientras aprenden las representaciones de las palabras [Bojanowski et al., 2016].

Se asocia una representación vectorial con cada  $n$ -gramo de caracteres.

Las palabras se representan como la suma de estas representaciones.

Tomando la palabra *where* y  $n = 3$ , se representará por los  $n$ -gramos de caracteres: <wh, whe, her, ere, re>, y la secuencia especial <where>.

Es importante tener en cuenta que la secuencia <her>, correspondiente a la palabra "her", es diferente del tri-grama "her" de la palabra "here".

FastText es útil para los idiomas con una rica morfología. Por ejemplo, las palabras "amazing" y "mazingly" comparten información en FastText a través de sus  $n$ -gramos compartidos, mientras que en Word2Vec estas dos palabras no tienen ninguna relación.

Sea  $\mathcal{G}_w$  el conjunto de  $n$ -gramos que aparecen en  $w$ .

FastText asocia un vector  $\vec{g}$  con cada  $n$ -gramo en  $\mathcal{G}_w$ .

En FastText, la probabilidad de que un par palabra-contexto  $(w, c)$  provenga del corpus de entrada  $D$  se calcula de la siguiente manera:

$$P(D|w, c) = \frac{1}{1 + e^{-s(w, c)}}$$

donde,

$$s(w, c) = \sum_{g \in G_w} \vec{g} \cdot \vec{c}.$$

El algoritmo de muestreo negativo se puede calcular de la misma forma que en el modelo skipgram con esta formulación.

## 7.8. Embeddings de frases específicas de sentimiento

El problema de los embeddings de palabras es que los antónimos pueden usarse en contextos similares, por ejemplo, "mi auto es lindo" vs "mi auto es feo".

En [Tang et al., 2014], se proponen embeddings de palabras específicos de sentimiento combinando el modelo skipgram con tweets con emoticones anotados :):).

Estos embeddings se utilizan para entrenar un clasificador de polaridad a nivel de palabra.

El modelo integra la información de sentimiento en la representación continua de frases mediante el desarrollo de una arquitectura neural adaptada.

Entrada:  $\{w_i, s_j, pol_j\}$ , donde  $w_i$  es una frase (o palabra),  $s_j$  es la oración y  $pol_j$  es la polaridad de la oración.

El objetivo de entrenamiento utiliza el embedding de  $w_i$  para predecir las palabras de contexto (de la misma manera que el modelo skipgram) y utiliza la representación de la oración  $se_j$  para predecir  $pol_j$ .

Las oraciones ( $se_j$ ) se representan promediando los vectores de palabras que las componen.

El objetivo de la parte de sentimiento es maximizar el promedio de la probabilidad logarítmica del sentimiento:

$$f_{sentimiento} = \frac{1}{S} \sum_{j=1}^S \log p(pol_j | se_j)$$

El objetivo de entrenamiento final es maximizar la combinación lineal de los objetivos skipgram y sentimiento:

$$f = \alpha f_{skipgram} + (1 - \alpha) f_{sentimiento}$$

## 7.9. Gensim

Gensim es una biblioteca de Python de código abierto para el procesamiento del lenguaje natural que implementa muchos algoritmos para entrenar word embeddings.

- <https://radimrehurek.com/gensim/>
- <https://machinelearningmastery.com/develop-word-embeddings-python-gensim/>





## Capítulo 8

# Etiquetado de Secuencias

### 8.1. Tareas de Etiquetado de Secuencias o Etiquetado

- El etiquetado de secuencias o etiquetado es una tarea en PNL que difiere de la clasificación de documentos.
- El objetivo es asignar etiquetas o etiquetas a una oración representada como una secuencia de tokens  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .
- En particular, el objetivo del etiquetado de secuencias es asignar etiquetas a palabras, o más generalmente, asignar etiquetas discretas a elementos discretos en una secuencia [Eisenstein, 2018].
- Ejemplos conocidos de esta tarea son el etiquetado de partes del discurso (POS) y el reconocimiento de entidades nombradas (NER).

### 8.2. Etiquetado de Partes del Discurso

**ENTRADA:** Los beneficios aumentaron en Boeing Co., superando fácilmente las previsiones en Wall Street, cuando su CEO Alan Mulally anunció los resultados del primer trimestre.

**SALIDA:** Los beneficios/N aumentaron/V en/P Boeing /N Co./N ./, superando/V fácilmente/ADV las/DET previsiones/N en/P Wall/N Street/N ./, cuando/P su/DET CEO/N Alan/N Mulally/N anunció/V los/DET resultados/N del/PREP primer/ADJ trimestre/N ./.

- N = Sustantivo
- V = Verbo

- **P** = Preposición
- **Adv** = Adverbio
- **Adj** = Adjetivo
- ...

Tag	Description	Example
Open Class	<b>ADJ</b> Adjective: noun modifiers describing properties	<i>red, young, awesome</i>
	<b>ADV</b> Adverb: verb modifiers of time, place, manner	<i>very, slowly, home, yesterday</i>
	<b>NOUN</b> words for persons, places, things, etc.	<i>algorithm, cat, mango, beauty</i>
	<b>VERB</b> words for actions and processes	<i>draw, provide, go</i>
	<b>PROPN</b> Proper noun: name of a person, organization, place, etc..	<i>Regina, IBM, Colorado</i>
Closed Class Words	<b>INTJ</b> Interjection: exclamation, greeting, yes/no response, etc.	<i>oh, um, yes, hello</i>
	<b>ADP</b> Adposition (Preposition/Postposition): marks a noun's spacial, temporal, or other relation	<i>in, on, by, under</i>
	<b>AUX</b> Auxiliary: helping verb marking tense, aspect, mood, etc.,	<i>can, may, should, are</i>
	<b>CCONJ</b> Coordinating Conjunction: joins two phrases/clauses	<i>and, or, but</i>
	<b>DET</b> Determiner: marks noun phrase properties	<i>a, an, the, this</i>
	<b>NUM</b> Numeral	<i>one, two, first, second</i>
	<b>PART</b> Particle: a function word that must be associated with another word	<i>'s, not, (infinitive) to</i>
	<b>PRON</b> Pronoun: a shorthand for referring to an entity or event	<i>she, who, I, others</i>
	<b>SCONJ</b> Subordinating Conjunction: joins a main clause with a subordinate clause such as a sentential complement	<i>that, which</i>
Other	<b>PUNCT</b> Punctuation	<i>: , ()</i>
	<b>SYM</b> Symbols like \$ or emoji	<i>\$, %</i>
	<b>X</b> Other	<i>asdf, qwfg</i>

Fuente: [Jurafsky and Martin, 2023]

### 8.3. Reconocimiento de Entidades Nombradas (NER)

Una **entidad nombrada** es, hablando en términos generales, cualquier cosa a la que se puede hacer referencia con un nombre propio: una persona, un lugar, una organización.

**ENTRADA:** Los beneficios aumentaron en Boeing Co., superando fácilmente las previsiones en Wall Street, cuando su CEO Alan Mulally anunció los resultados del primer trimestre.

**SALIDA:** Los beneficios aumentaron en [Compañía Boeing Co.], superando fácilmente las previsiones en [Lugar Wall Street], cuando su CEO [Persona Alan Mulally] anunció los resultados del primer trimestre.

- Dado que las entidades pueden abarcar varias palabras (es decir, un problema de reconocimiento de fragmentos), podemos utilizar el etiquetado BIO [Ramshaw and Marcus, 1999] para convertir el problema en un problema de etiquetado de secuencias.

- Etiquetado BIO: utilizar etiquetas que capturen tanto el límite como el tipo de entidad nombrada.

**Etiquetado BIO: NER como Etiquetado de Secuencias** **ENTRADA:** Los beneficios aumentaron en Boeing Co., superando fácilmente las previsiones en Wall Street, cuando su CEO Alan Mulally anunció los resultados del primer trimestre.

**SALIDA:** Los/O beneficios/O aumentaron/O en/O Boeing/B-C Co./I-C ,/O superando/O fácilmente/O las/O previsiones/O en/O Wall/B-L Street/I-L,/O cuando/O su/O CEO/O Alan/B-P Mulally/I-P anunció/O los/O resultados/O del/O primer/O trimestre/O ./O

- O = Fuera (sin entidad)
- B-C = Comienzo de Compañía
- I-C = Dentro de Compañía
- B-L = Comienzo de Lugar
- I-L = Dentro de Lugar
- B-P = Comienzo de Persona
- I-P = Dentro de Persona

Nuestro objetivo: **Conjunto de entrenamiento:**

1. Pierre/NNP Vinken/NNP/, 61/CD años/NNS de edad/JJ/, se unirá a la junta directiva como director no ejecutivo el 29 de noviembre./NNP
2. El Sr./NNP Vinken/NNP es presidente/NN de Elsevier/NNP N.V./NNP, el grupo editorial holandés./NNP
3. Rudolph/NNP Agnew/NNP/, de 55/CD años/NNS y presidente/NN de...

### 8.3.1. Etiquetado de secuencias como aprendizaje supervisado

- Tenemos una secuencia de entradas  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  y las etiquetas correspondientes  $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ .
- La tarea consiste en aprender una función  $f$  que mapea secuencias de entrada a secuencias de etiquetas:  $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = y_1, y_2, \dots, y_n$ .
- Tenemos un conjunto de entrenamiento de secuencias etiquetadas:  $\{(x^{(1)}, y^{(1)}), (x^{(2)}, y^{(2)}), \dots, (x^{(m)}, y^{(m)})\}$ .

### 8.3.2. Enfoque generativo para el etiquetado de secuencias

- Los modelos generativos, como el clasificador de Naive Bayes utilizado para clasificación, también se pueden utilizar para tareas de etiquetado de secuencias en PLN.
- Enfoque:
  - Entrenamiento: Aprender la distribución conjunta  $p(x_1, x_2, \dots, x_n, y_1, y_2, \dots, y_n)$  de las secuencias de entrada.
  - Decodificación: Utilizar la distribución aprendida para predecir secuencias de etiquetas para nuevas secuencias de entrada.
- La decodificación en el etiquetado de secuencias implica encontrar la secuencia de etiquetas con la mayor probabilidad conjunta:  $\arg \max_{y_1, y_2, \dots, y_n} p(x_1, x_2, \dots, x_n, y_1, y_2, \dots, y_n)$ .

## 8.4. Modelos Ocultos de Markov

- Los Modelos Ocultos de Markov (HMM, por sus siglas en inglés) proporcionan una forma sistemática de manejar problemas de etiquetado de secuencias mediante modelos generativos y algoritmos de decodificación eficientes.
- Tenemos una oración de entrada  $x = x_1, x_2, \dots, x_n$  ( $x_i$  es la  $i$ -ésima palabra en la oración).
- Tenemos una secuencia de etiquetas  $y = y_1, y_2, \dots, y_n$  ( $y_i$  es la  $i$ -ésima etiqueta en la oración).
- Usaremos un HMM para definir  $p(x_1, x_2, \dots, x_n, y_1, y_2, \dots, y_n)$  para cualquier oración  $x_1, \dots, x_n$  y secuencia de etiquetas  $y_1, \dots, y_n$  de la misma longitud [Kupiec, 1992].
- Luego, la secuencia de etiquetas más probable para  $x$  es:

$$\arg \max_{y_1, \dots, y_n} p(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_n)$$

## 8.5. Modelos Ocultos de Markov Trigramas (Trigram HMM)

Para cualquier oración  $x_1, \dots, x_n$  donde  $x_i \in V$  para  $i = 1, \dots, n$ , y cualquier secuencia de etiquetas  $y_1, \dots, y_{n+1}$  donde  $y_i \in S$  para  $i = 1, \dots, n$ , y  $y_{n+1} = \text{STOP}$ , la probabilidad conjunta de la oración y la secuencia de etiquetas es:

$$p(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_{n+1}) = \prod_{i=1}^{n+1} q(y_i | y_{i-2}, y_{i-1}) \prod_{i=1}^n e(x_i | y_i)$$

donde hemos asumido que  $x_0 = x_{-1} = *$ .

### 8.5.1. Parámetros del modelo

- $q(s|u, v)$  para cualquier  $s \in S \cup \{\text{STOP}\}$ ,  $u, v \in S \cup \{*\}$ 
  - El valor de  $q(s|u, v)$  se puede interpretar como la probabilidad de ver la etiqueta  $s$  inmediatamente después del bigrama de etiquetas  $(u, v)$ .
- $e(x|s)$  para cualquier  $s \in S$ ,  $x \in V$ 
  - El valor de  $e(x|s)$  se puede interpretar como la probabilidad de ver la observación  $x$  emparejada con el estado  $s$ .

**Un ejemplo** Si tenemos  $n = 3$ ,  $x_1, x_2, x_3$  igual a la oración “the dog laughs”, y  $y_1, y_2, y_3, y_4$  igual a la secuencia de etiquetas “D N V STOP”, entonces:

$$\begin{aligned} p(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_{n+1}) &= q(D|*, *) \times q(N|*, D) \\ &\quad \times q(V|D, N) \times q(\text{STOP}|N, V) \\ &\quad \times e(\text{el}|D) \times e(\text{perro}|N) \times e(\text{se}|V) \times e(\text{ríe}|STOP) \end{aligned}$$

- STOP es una etiqueta especial que termina la secuencia.
- Tomamos  $y_0 = y_{-1} = *$ , donde \* es un símbolo especial de "padding".

### 8.6. Supuestos de independencia en los HMM trigramas

- Los Modelos Ocultos de Markov trigramas (HMM trigramas) se derivan mediante la realización de supuestos específicos de independencia en el modelo.
- Consideremos dos secuencias de variables aleatorias:  $X_1, \dots, X_n$  y  $Y_1, \dots, Y_n$ , donde  $n$  es la longitud de las secuencias.
- Cada  $X_i$  puede tomar cualquier valor en un conjunto finito  $V$  de palabras, y cada  $Y_i$  puede tomar cualquier valor en un conjunto finito  $K$  de etiquetas posibles (por ejemplo,  $K = \{D, N, V, \dots\}$ ).
- Nuestro objetivo es modelar la probabilidad conjunta:

$$\begin{aligned}
P(x_1, x_2, \dots, x_n, y_1, \dots, y_n) \\
&= p(y_1) \times p(y_2|y_1) \\
&\quad \times \dots \\
&\quad \times p(y_n|y_{n-1}, y_{n-2}, \dots, y_1) \\
&\quad \times p(x_1|y_n, y_{n-1}, \dots, y_1) \\
&\quad \times p(x_2|x_1, y_n, y_{n-1}, \dots, y_1) \\
&\quad \times p(x_n|x_{n-1}, \dots, x_1, y_n, y_{n-1}, \dots, y_1)
\end{aligned}$$

- Definimos una variable aleatoria adicional  $Y_{n+1}$  que siempre toma el valor "STOP".
- La idea clave en los HMM es la factorización de la probabilidad conjunta:

$$\begin{aligned}
&P(X_1 = x_1, \dots, X_n = x_n, Y_1 = y_1, \dots, Y_{n+1} = y_{n+1}) \\
&= \prod_{i=1}^{n+1} P(Y_i = y_i | Y_{i-2} = y_{i-2}, Y_{i-1} = y_{i-1}) \times \prod_{i=1}^n P(X_i = x_i | Y_i = y_i)
\end{aligned}$$

- Primero asumimos que:

$$P(Y_i = y_i | Y_{i-2} = y_{i-2}, Y_{i-1} = y_{i-1}) = q(y_i | y_{i-2}, y_{i-1})$$

- Esto asume que la secuencia  $Y_1, \dots, Y_{n+1}$  es una secuencia de Markov de segundo orden, donde cada estado depende solo de los dos estados anteriores.
- Y también asumimos que:

$$P(X_i = x_i | Y_i = y_i) = e(x_i | y_i)$$

- Esto asume que las observaciones y los estados están condicionalmente independientes dadas las etiquetas.

## 8.7. ¿Por qué el nombre?

$$\begin{aligned}
p(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_n) &= q(\text{STOP} | y_{n-1}, y_n) \\
&\quad \times \prod_{j=1}^n q(y_j | y_{j-2}, y_{j-1}) \\
&\quad \times \prod_{j=1}^n e(x_j | y_j)
\end{aligned}$$

Los componentes de la cadena de Markov:

$$q(\text{STOP}|y_{n-1}, y_n) \times \prod_{j=1}^n q(y_j|y_{j-2}, y_{j-1})$$

Estas transiciones no se observan directamente para una secuencia dada de palabras  $(x_1, \dots, x_n)$ , de ahí el nombre de ".ocultas".

El componente observable:

$$\prod_{j=1}^n e(x_j|y_j)$$

El componente observable de los HMM modela las probabilidades de emisión de los símbolos observados ( $x$ ) condicionados a los estados ocultos correspondientes ( $y$ ).

## 8.8. Estimación Suavizada

$$\begin{aligned} q(Vt|DT, JJ) = & \lambda_1 \times \frac{\text{Count}(Dt, JJ, Vt)}{\text{Count}(Dt, JJ)} \\ & + \lambda_2 \times \frac{\text{Count}(JJ, Vt)}{\text{Count}(JJ)} \\ & + \lambda_3 \times \frac{\text{Count}(Vt)}{\text{Count}()} \end{aligned}$$

donde  $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$ , y para todo  $i$ ,  $\lambda_i \geq 0$ .

$$e(\text{base}|Vt) = \frac{\text{Count}(Vt, \text{base})}{\text{Count}(Vt)}$$

## 8.9. Tratando con Palabras de Baja Frecuencia

Un método común es el siguiente:

- Paso 1: Dividir el vocabulario en dos conjuntos
  - Palabras frecuentes = palabras que ocurren  $\geq 5$  veces en el entrenamiento
  - Palabras de baja frecuencia = todas las demás palabras
- Paso 2: Mapear las palabras de baja frecuencia a un conjunto pequeño y finito, dependiendo de prefijos, sufijos, etc.

A continuación se muestra un ejemplo de clases de palabras para el reconocimiento de entidades nombradas [Bikel et al., 1999]:

Clase de palabra	Ejemplo	Intuición
twoDigitNum	90	Año de dos dígitos
fourDigitNum	1990	Año de cuatro dígitos
containsdígito y letra	48956 – 67	Código de producto
containsDigitAndDash	09 – 96	Fecha
containsDigitAndSlash	11/9/89	Fecha
containsDigitAndComma	23,000,00	Cantidad monetaria
containsDigitAndPeriod	1,00	Cantidad monetaria, porcentaje
othernum	456789	Otro número
allCaps	BBN	Organización
capPeriod	M.	Inicial de nombre de persona
firstWord	Primera palabra de la oración	Sin información útil de capitalización
initCap	Sally	Palabra capitalizada
lowercase	can	Palabra sin capitalizar
other	,	Signos de puntuación, todas las demás pa

## 8.10. Problema de Decodificación

Problema de decodificación: Para una entrada  $x_1 \dots x_n$ , encontrar

$$\arg \max_{y_1 \dots y_{n+1}} p(x_1 \dots x_n, y_1 \dots y_{n+1})$$

donde  $\arg \max$  se toma sobre todas las secuencias  $y_1 \dots y_{n+1}$  tales que  $y_i \in S$  para  $i = 1 \dots n$ , y  $y_{n+1} = \text{STOP}$ .

Suponemos que  $p$  toma la forma:

$$p(x_1 \dots x_n, y_1 \dots y_{n+1}) = \prod_{i=1}^{n+1} q(y_i | y_{i-2}, y_{i-1}) \prod_{i=1}^n e(x_i | y_i)$$

Recordemos que hemos asumido en esta definición que  $y_0 = y_{-1} = *$  y  $y_{n+1} = \text{STOP}$ .

### 8.10.1. Método Bruto Ingenuo

El método bruto ingenuo para encontrar la secuencia de etiquetas con la puntuación más alta es enumerar todas las posibles secuencias de etiquetas  $y_1, \dots, y_{n+1}$ , calcular su puntuación utilizando la función  $p$  y seleccionar la secuencia con la puntuación más alta.

- Ejemplo:

- Oración de entrada: *the dog barks*

- Conjunto de etiquetas posibles:  $K = \{D, N, V\}$
- Enumerar todas las posibles secuencias de etiquetas:
  - $D D D STOP$
  - $D D N STOP$
  - $D D V STOP$
  - $D N D STOP$
  - $D N N STOP$
  - $D N V STOP$
  - ...

En este caso, hay  $3^3 = 27$  secuencias posibles. Sin embargo, para oraciones más largas, este método se vuelve ineficiente. Para una oración de entrada de longitud  $n$ , hay  $|K|^n$  secuencias posibles de etiquetas. El crecimiento exponencial hace que la búsqueda exhaustiva sea impracticable para oraciones de longitud razonable.

## 8.11. Decodificación de Viterbi con Programación Dinámica

El algoritmo utilizado por los HMM para realizar una decodificación eficiente se denomina decodificación de Viterbi. La decodificación de Viterbi utiliza programación dinámica, que es una técnica para resolver problemas de optimización dividiéndolos en subproblemas superpuestos. Al almacenar las soluciones a estos subproblemas en una tabla, no es necesario recalcularlos, lo que mejora considerablemente la eficiencia de los algoritmos. A continuación, mostramos cómo funciona la programación dinámica con dos ejemplos: el factorial y Fibonacci.

### Factorial

- Implementación recursiva:
- ```
def recur_factorial(n):
    # Caso base
    if n == 1:
        return n
    else:
        return n * recur_factorial(n-1)
```

- Implementación con programación dinámica:

```

def dynamic_factorial(n):
    tabla = [0 for i in range(0, n+1)]

        # Caso base
        tabla[0] = 1

        for i in range(1, len(tabla)):
            tabla[i] = i * tabla[i-1]

    return tabla[n]

```

## Fibonacci

- Implementación recursiva:

```

def recur_fibonacci(n):
    if n == 1 or n == 0:
        return 1
    else:
        return recur_fibonacci(n-1) + recur_fibonacci(n-2)

```

- Implementación con programación dinámica:

```

def dynamic_fibonacci(n):
    tabla = [0 for i in range(0, n+1)]

        # Caso base
        tabla[0] = 1
        tabla[1] = 1

        for i in range(2, len(tabla)):
            tabla[i] = tabla[i-1] + tabla[i-2]

    return tabla[n]

```

**Complejidad** En las implementaciones recursivas, la complejidad puede ser bastante alta debido a los cálculos repetidos de los mismos subproblemas. Sin embargo, la programación dinámica puede reducir significativamente la complejidad al almacenar las soluciones a los subproblemas en una tabla o matriz y reutilizarlas cuando sea necesario. Este enfoque elimina los cálculos redundantes y permite una computación más eficiente. En el caso de Fibonacci, la complejidad se reduce de exponencial a lineal.

## 8.12. El Algoritmo de Viterbi

El algoritmo de Viterbi calcula eficientemente la máxima probabilidad de una secuencia de etiquetas utilizando programación dinámica.

**Definiciones:**

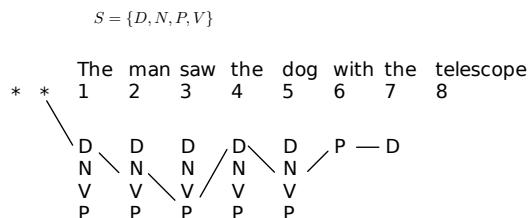
- Definimos  $n$  como la longitud de la oración.
- Definimos  $S_k$  para  $k = -1 \dots n$  como el conjunto de etiquetas posibles en la posición  $k$ :  $S_{-1} = S_0 = \{*\}$ ,  $S_k = S$  para  $k \in \{1 \dots n\}$ .
- Definimos una versión truncada de la probabilidad codificada por el HMM hasta la posición  $k$ ,  $r(y_{-1}, y_0, y_1, \dots, y_k)$ , como:

$$r(y_{-1}, y_0, y_1, \dots, y_k) = \prod_{i=1}^k q(y_i | y_{i-2}, y_{i-1})$$

- Definimos una tabla de programación dinámica  $\pi(k, u, v)$  como la máxima probabilidad de una secuencia de etiquetas que termina en las etiquetas  $u, v$  en la posición  $k$ :

$$\pi(k, u, v) = \max_{y_{-1}, y_0, y_1, \dots, y_{k-1}: y_{k-1}=u, y_k=v} r(y_{-1}, y_0, y_1, \dots, y_k)$$

**Un Ejemplo** Recuerde que  $\pi(k, u, v)$  es la máxima probabilidad de una secuencia de etiquetas que termina en las etiquetas  $u, v$  en la posición  $k$ .



- Hay muchas secuencias posibles de etiquetas.
- Cada una de ellas tiene una probabilidad calculada a partir de los parámetros  $q$  y  $e$ .
- $\pi(7, P, D)$  es la máxima probabilidad de que una de estas secuencias de etiquetas termine en  $P$  y  $D$  en la posición 7.
- La ruta representa la secuencia con la máxima probabilidad.

### 8.12.1. Una Definición Recursiva

**Caso base:**

$$\pi(0, *, *) = 1$$

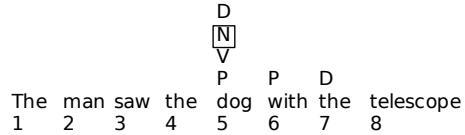
**Definición recursiva:**

Para cualquier  $k \in \{1 \dots n\}$ , para cualquier  $u \in S_{k-1}$  y  $v \in S_k$ :

$$\pi(k, u, v) = \max_{w \in S_{k-2}} (\pi(k-1, w, u) \times q(v|w, u) \times e(x_k|v))$$

**Justificación de la Definición Recursiva** Para cualquier  $k \in \{1 \dots n\}$ , para cualquier  $u \in S_{k-1}$  y  $v \in S_k$ :

$$\pi(k, u, v) = \max_{w \in S_{k-2}} (\pi(k-1, w, u) \times q(v|w, u) \times e(x_k|v))$$



$$\begin{aligned} \mathcal{S}_5 &= \mathcal{S} = \{D, N, V, P\} \\ \Pi(7, P, D) &= \max_{w \in \mathcal{S}_5} (\Pi(6, w, P) \times q(D|w, P) \times e(\text{the}|D)) \end{aligned}$$

- Consideremos una secuencia de etiquetas arbitraria que termina con las etiquetas  $P$  y  $D$  en la posición 7.
- Debe contener alguna etiqueta en la posición 5.
- Básicamente, estamos buscando la etiqueta que maximiza la probabilidad en la posición 5.

### 8.12.2. El Algoritmo de Viterbi

---

#### Algorithm 1: Algoritmo de Viterbi

---

**Entrada:** una oración  $x_1 \dots x_n$ , parámetros  $q(s|u, v)$  y  $e(x|s)$   
**Inicialización:** Establecer  $\pi(0, *, *) = 1; S_{-1} = S_0 = \{*\}, S_k = S$  para  $k \in \{1 \dots n\}$ .

```

for  $k = 1$  to  $n$  do
    for  $u \in S_{k-1}, v \in S_k$  do
        |  $\pi(k, u, v) = \max_{w \in S_{k-2}} (\pi(k-1, w, u) \times q(w|u) \times e(x_k|v))$ 
        | end
    end
    retornar ( $\max_{u \in S_{n-1}, v \in S_n} (\pi(n, u, v) \times q(STOP|u, v))$ )

```

---

### 8.12.3. El Algoritmo de Viterbi con Punteros de Retroceso

---

#### Algorithm 2: Algoritmo de Viterbi con Punteros de Retroceso

---

**Entrada:** una oración  $x_1 \dots x_n$ , parámetros  $q(s|u, v)$  y  $e(x|s)$   
**Inicialización:** Establecer  $\pi(0, *, *) = 1; S_{-1} = S_0 = \{*\}, S_k = S$  para  $k \in \{1 \dots n\}$ .

```

for  $k = 1$  to  $n$  do
    for  $u \in S_{k-1}, v \in S_k$  do
        |  $\pi(k, u, v) = \max_{w \in S_{k-2}} (\pi(k-1, w, u) \times q(w|u) \times e(x_k|v))$ 
        |  $bp(k, u, v) = \arg \max_{w \in S_{k-2}} (\pi(k-1, w, u) \times q(w|u) \times e(x_k|v))$ 
        | end
    end
     $(y_{n-1}, y_n) = \arg \max_{(u,v)} (\pi(n, u, v) \times q(STOP|u, v));$  // Find
    maximum probability and corresponding tags
    for  $k = (n - 2)$  to  $1$  do
        |  $y_k = bp(k + 2, y_{k+1}, y_{k+2});$  // Retrieve tag sequence
        | using backpointers
    end
    retornar (the tag sequence  $y_1 \dots y_n$ ); // Return the final tag
    sequence

```

---

En el Algoritmo 2, se utiliza el puntero de retroceso para reconstruir la secuencia de etiquetas con la máxima probabilidad. El algoritmo recorre las tablas  $\pi$  en orden inverso, comenzando desde la posición  $n$  hasta la posición 1. En cada iteración, se elige la etiqueta  $u$  y  $v$  que maximizan la expresión  $\pi(k, u, v) \times q(STOP|u, v)$ . Estas etiquetas se agregan al comienzo de la secuencia

de etiquetas  $path$ , y al final del algoritmo, se devuelve la secuencia  $path[1 : -1]$ , eliminando las etiquetas de inicio y detención.

Con el algoritmo de Viterbi, podemos encontrar eficientemente la secuencia de etiquetas más probable para una oración dada, utilizando programación dinámica y aprovechando la estructura de dependencia entre las etiquetas en el HMM. Esto es especialmente útil en problemas de etiquetado de secuencias, como el etiquetado de partes del habla en NLP.

#### 8.12.4. El Algoritmo de Viterbi: Tiempo de Ejecución

El tiempo de ejecución del algoritmo de Viterbi se puede analizar de la siguiente manera:

- Se requiere un tiempo de  $O(n|S|^3)$  para calcular  $q(s|u, v) \times e(x_k|s)$  para todos los valores de  $k, s, u, v$ .
- La tabla  $\pi$  tiene  $n|S|^2$  entradas que deben ser llenadas.
- Se necesita un tiempo de  $O(|S|)$  para llenar una entrada.

Por lo tanto, el tiempo de ejecución total es  $O(n|S|^3)$ .

**Ventajas y Desventajas** El uso de etiquetadores basados en Modelos de Markov Ocultos (HMM) presenta ciertas ventajas y desventajas:

- Los etiquetadores HMM son fáciles de entrenar (se recopilan conteos a partir de un corpus de entrenamiento).
- Tienen un rendimiento relativamente bueno (más del 90 % de precisión en el reconocimiento de entidades nombradas).
- La principal dificultad radica en modelar  $e(\text{palabra}|\text{etiqueta})$ , lo cual puede ser muy complejo si las "palabras" son complejas.

Aunque los etiquetadores HMM tienen ventajas en términos de simplicidad y rendimiento, la modelización de la probabilidad condicional  $e(\text{palabra}|\text{etiqueta})$  puede resultar desafiante en situaciones donde las palabras son complejas o ambiguas. En tales casos, se pueden requerir técnicas más avanzadas para mejorar la precisión del etiquetado de secuencias.

### 8.13. MEMMs

- Los modelos de Markov de entropía máxima (MEMMs) utilizan modelos log-lineales multiclas para tareas de etiquetado de secuencias [McCallum et al., 2000].
- En la literatura temprana de PLN, la regresión logística a menudo se llamaba clasificación de entropía máxima [Eisenstein, 2018].

- Por lo tanto, los MEMMs se parecerán mucho a los modelos de softmax multiclas vistos en la conferencia sobre modelos lineales.
- A diferencia de los HMM, aquí confiamos en funciones parametrizadas.
- El objetivo de los MEMMs es modelar la siguiente distribución condicional:

$$P(s_1, s_2 \dots, s_m | x_1, \dots, x_m)$$

- Donde cada  $x_j$  para  $j = 1 \dots m$  es el símbolo de entrada  $j$  (por ejemplo, la  $j$ -ésima palabra en una oración), y cada  $s_j$  para  $j = 1 \dots m$  es la  $j$ -ésima etiqueta<sup>1</sup>.
- Esperaríamos que  $P(\text{DET}, \text{NOUN}, \text{VERB}|\text{the}, \text{dog}, \text{barks})$  sea mayor que  $P(\text{VERB}, \text{VERB}, \text{VERB}|\text{the}, \text{dog}, \text{barks})$  en un modelo entrenado a partir de un conjunto de datos de entrenamiento de etiquetado POS.
- Usamos  $S$  para denotar el conjunto de etiquetas posibles.
- Suponemos que  $S$  es un conjunto finito.
- Por ejemplo, en el etiquetado de partes del habla en inglés,  $S$  sería el conjunto de todas las posibles partes del habla en inglés (sustantivo, verbo, determinante, preposición, etc.).
- Dada una secuencia de palabras  $x_1, \dots, x_m$ , hay  $k^m$  secuencias posibles de partes del habla  $s_1, \dots, s_m$ , donde  $k = |S|$  es el número de partes del habla posibles.
- Queremos estimar una distribución sobre estas  $k^m$  secuencias posibles.
- En un primer paso, los MEMMs usan la siguiente descomposición ( $s_0$  siempre tiene una etiqueta especial \*):

$$\begin{aligned} P(s_1, s_2 \dots, s_m | x_1, \dots, x_m) &= \prod_{i=1}^m P(s_i | s_1 \dots, s_{i-1}, x_1, \dots, x_m) \\ &= \prod_{i=1}^m P(s_i | s_{i-1}, x_1, \dots, x_m) \end{aligned} \tag{8.1}$$

- La primera igualdad es exacta (se sigue de la regla de la cadena de probabilidades condicionales).

---

<sup>1</sup>Estas diapositivas se basan en notas de conferencia de Michael Collins <http://www.cs.columbia.edu/~mcollins/crf.pdf>. La notación y la terminología se han adaptado para ser coherentes con el resto del curso.

- La segunda igualdad se deriva de un supuesto de independencia, a saber, que para todo  $i$ ,

$$P(s_i|s_1 \dots, s_{i-1}, x_1, \dots, x_m) = P(s_i|s_{i-1}, x_1, \dots, x_m)$$

- Por lo tanto, estamos haciendo una suposición de Markov de primer orden similar a la suposición de Markov realizada en los HMM<sup>2</sup>.
- La etiqueta en la posición  $i$  depende solo de la etiqueta en la posición  $(i-1)$ .
- Habiendo hecho estas suposiciones de independencia, luego modelamos cada término usando un modelo log-lineal multiclasa (softmax):

$$P(s_i|s_{i-1}, x_1, \dots, x_m) = \frac{\exp(\vec{w} \cdot \vec{\phi}(x_1, \dots, x_m, i, s_{i-1}, s_i))}{\sum_{s' \in S} \exp(\vec{w} \cdot \vec{\phi}(x_1, \dots, x_m, i, s_{i-1}, s'))} \quad (8.2)$$

Aquí,  $\vec{\phi}(x_1, \dots, x_m, i, s_{i-1}, s_i)$  es un vector de características donde:

- $x_1, \dots, x_m$  es la oración completa que se está etiquetando.
- $i$  es la posición a etiquetar (puede tomar cualquier valor de 1 a  $m$ ).
- $s_{i-1}$  es el valor de la etiqueta anterior (puede tomar cualquier valor en  $S$ ).
- $s_i$  es el nuevo valor de la etiqueta (puede tomar cualquier valor en  $S$ ).

El alcance del vector de características está **restringido** a toda la secuencia de entrada  $x_1, x_m$ , y solo las etiquetas anteriores y actuales. Esta restricción permite el entrenamiento eficiente tanto de los MEMMs como de los CRFs.

## 8.14. Ejemplo de características utilizadas en el etiquetado de partes del habla

1.  $\vec{\phi}(x_1, \dots, x_m, i, s_{i-1}, s_i)_{[1]} = 1$  si  $s_i = \text{ADVERB}$  y la palabra  $x_i$  termina en “-ly”; 0 en caso contrario.

Si el peso  $\vec{w}_{[1]}$  asociado con esta característica es grande y positivo, entonces esta característica está diciendo básicamente que preferimos etiquetas donde las palabras que terminan en -ly se etiquetan como ADVERB.

---

<sup>2</sup>De hecho, hicimos una suposición de Markov de segundo orden en los HMM. Los MEMMs también se pueden extender a suposiciones de segundo orden.

2.  $\vec{\phi}(x_1, \dots, x_m, i, s_{i-1}, s_i)_{[2]} = 1$  si  $i = 1$ ,  $s_i = \text{VERB}$  y  $x_m = ?$ ; 0 en caso contrario.

Si el peso  $\vec{w}_{[2]}$  asociado con esta característica es grande y positivo, entonces se prefieren las etiquetas que asignan VERB a la primera palabra de una pregunta (por ejemplo, "¿Es esta una oración que comienza con un verbo?").

3.  $\vec{\phi}(x_1, \dots, x_m, i, s_{i-1}, s_i)_{[3]} = 1$  si  $s_{i-1} = \text{ADJECTIVE}$  y  $s_i = \text{NOUN}$ ; 0 en caso contrario.

Nuevamente, un peso positivo para esta característica significa que los adjetivos tienden a ir seguidos de sustantivos.

4.  $\vec{\phi}(x_1, \dots, x_m, i, s_{i-1}, s_i)_{[4]} = 1$  si  $s_{i-1} = \text{PREPOSITION}$  y  $s_i = \text{PREPOSITION}$ . Un peso negativo  $\vec{w}_{[4]}$  para esta función significaría que las preposiciones no tienden a seguir a las preposiciones.

<sup>3</sup>Fuente: <https://blog.echen.me/2012/01/03/introduction-to-conditional-random-fields/>

## 8.15. Plantillas de características

Es posible definir plantillas de características más generales que cubran unigramas, bigramas, n-gramas de palabras, así como valores de etiqueta de  $s_{i-1}$  y  $s_i$ .

1. Una plantilla de características de unigramas de palabras y unigramas de etiquetas:  $\vec{\phi}(x_1, \dots, x_m, i, s_{i-1}, s_i)_{[\text{index}(j, z)]} = 1$  si  $s_i = \text{TAG}_{[j]}$  y  $x_i = \text{WORD}_{[z]}$ ; 0 en caso contrario  $\forall j, z$ .

Nótese que  $j$  es un índice que abarca todas las etiquetas posibles en  $S$  y  $z$  es otro índice que abarca las palabras en el vocabulario  $V$ .

2. Una plantilla de características de bigramas de palabras y bigramas de etiquetas:  $\vec{\phi}(x_1, \dots, x_m, i, s_{i-1}, s_i)_{[\text{index}(j, z, u, v)]} = 1$  si  $s_{i-1} = \text{TAG}_{[j]}$ ,  $s_i = \text{TAG}_{[z]}$ ,  $x_{i-1} = \text{WORD}_{[u]}$  y  $x_i = \text{WORD}_{[v]}$ ; 0 en caso contrario  $\forall j, z, u, v$ .

La función  $\text{index}(j, k, \dots)$  asignará a cada característica diferente un índice único en el vector de características.

Nótese que el vector resultante tendrá una dimensión muy alta y será disperso.

### Ejemplo

## 8.16. MEMMs y Softmax Multiclasificación

- Observemos que el modelo log-lineal mencionado anteriormente es muy similar al modelo softmax multiclasificación presentado en la conferencia sobre modelos lineales.

Figura 8.1: Ejemplo de características en el etiquetado de partes del habla

$$P(s_i|s_{i-1}, x_1, \dots, x_m) = \frac{\exp(\vec{w} \cdot \vec{\phi}(x_1, \dots, x_m, i, s_{i-1}, s_i))}{\sum_{s' \in S} \exp(\vec{w} \cdot \vec{\phi}(x_1, \dots, x_m, i, s_{i-1}, s'))}$$

Example:

|                      |    |    |     |
|----------------------|----|----|-----|
| 1                    | 2  | 3  | 4   |
| The dog barks loudly |    |    |     |
| DT                   | NN | VB | ADV |

Let's check that  $P(s_4 = \text{ADV}|s_3 = \text{VB, the,dog,barks,loudly}) > P(s_4 = \text{VB}|s_3 = \text{VB, the,dog,barks,loudly})$

$$P(s_4 = \text{ADV}|s_3 = \text{VB, the,dog,barks,loudly}) = \frac{\exp(\vec{w} \cdot \vec{\phi}(\text{the,dog,barks,loudly, 4, VB, ADV}))}{\sum_{s' \in S} \exp(\vec{w} \cdot \vec{\phi}(\text{the,dog,barks,loudly, 4, VB, } s'))}$$

$$P(s_4 = \text{VB}|s_3 = \text{VB, the,dog,barks,loudly}) = \frac{\exp(\vec{w} \cdot \vec{\phi}(\text{the,dog,barks,loudly, 4, VB, VB}))}{\sum_{s' \in S} \exp(\vec{w} \cdot \vec{\phi}(\text{the,dog,barks,loudly, 4, VB, } s'))}$$

- Un modelo log-lineal general tiene la siguiente forma:

$$P(y|x; \vec{w}) = \frac{\exp(\vec{w} \cdot \vec{\phi}(x, y))}{\sum_{y' \in Y} \exp(\vec{w} \cdot \vec{\phi}(x, y'))}$$

- Un modelo softmax multiclas tiene la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \hat{y} &= \text{softmax}(\vec{x} \cdot W + \vec{b}) \\ \hat{y}_{[i]} &= \frac{e^{(\vec{x} \cdot W + \vec{b})_{[i]}}}{\sum_j e^{(\vec{x} \cdot W + \vec{b})_{[j]}}} \end{aligned} \tag{8.3}$$

- Diferencia 1: en el modelo log-lineal tenemos un vector de parámetros fijo  $\vec{w}$  en lugar de tener múltiples vectores (una columna de  $W$  por cada valor de clase).
- Diferencia 2: el vector de características del modelo log-lineal  $\vec{\phi}(x, y)$  incluye información de la etiqueta  $y$ , mientras que el vector de entrada  $\vec{x}$  del modelo softmax es independiente de  $y$ .
- Los modelos log-lineales permiten usar características que consideran la interacción entre  $x$  e  $y$  (por ejemplo,  $x$  termina en "ly" e  $y$  es un ADVERBIO).

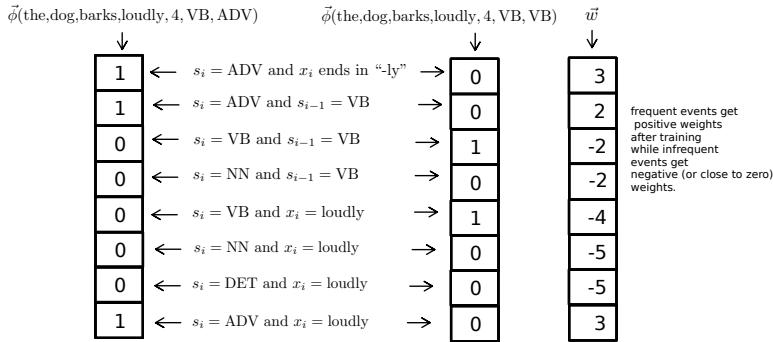
## 8.17. Entrenamiento de los MEMMs

- Una vez que hemos definido los vectores de características  $\vec{\phi}$ , podemos entrenar los parámetros  $\vec{w}$  del modelo de la misma manera que se entrena los modelos lineales.

Figura 8.2: Ejemplo de características en el etiquetado de partes del habla (continuación)

This is the same as checking if:

$$\vec{w} \cdot \vec{\phi}(\text{the}, \text{dog}, \text{barks}, \text{loudly}, 4, \text{VB}, \text{ADV}) > \vec{w} \cdot \vec{\phi}(\text{the}, \text{dog}, \text{barks}, \text{loudly}, 4, \text{VB}, \text{VB})$$



$$\vec{w} \cdot \vec{\phi}(\text{the}, \text{dog}, \text{barks}, \text{loudly}, 4, \text{VB}, \text{ADV}) = 1 * 3 + 1 * 2 + 1 * 3 = 6$$

$$> \vec{w} \cdot \vec{\phi}(\text{the}, \text{dog}, \text{barks}, \text{loudly}, 4, \text{VB}, \text{VB}) = 1 * -2 + 1 * -4 = -6$$

- Establecemos la log-verosimilitud negativa como función de pérdida y optimizamos los parámetros utilizando descenso de gradiente a partir de los ejemplos de entrenamiento.
- Esto es equivalente a usar la pérdida de entropía cruzada.
- ¿Cuálquier pérdida que consista en una log-verosimilitud negativa es una entropía cruzada entre la distribución empírica definida por el conjunto de entrenamiento y la distribución de probabilidad definida por el modelo?"[Goodfellow et al., 2016].

## 8.18. Decodificación con MEMMs

- El problema de decodificación es el siguiente.
- Se nos proporciona una nueva secuencia de prueba  $x_1, \dots, x_m$ .
- Nuestro objetivo es calcular la secuencia de estados más probable para esta secuencia de prueba,

$$\arg \max_{s_1, \dots, s_m} P(s_1, \dots, s_m | x_1, \dots, x_m). \quad (8.4)$$

- Hay  $k^m$  posibles secuencias de estados, por lo que para cualquier longitud de oración razonablemente grande  $m$ , la búsqueda exhaustiva de todas las posibilidades no será posible.

- Podemos usar el algoritmo de Viterbi de manera similar a como se usa para los HMM.
- La estructura de datos básica en el algoritmo será una tabla de programación dinámica  $\pi$  con entradas  $\pi[j, s]$  para  $j = 1, \dots, m$  y  $s \in S$ .
- $\pi[j, s]$  almacenará la probabilidad máxima para cualquier secuencia de estados que termine en el estado  $s$  en la posición  $j$ .
- Formalmente, nuestro algoritmo calculará

$$\pi[j, s] = \max_{s_1, \dots, s_{j-1}} \left( P(s|s_{j-1}, x_1, \dots, x_m) \prod_{k=1}^{j-1} P(s_k|s_{k-1}, x_1, \dots, x_m) \right)$$

para todo  $j = 1, \dots, m$  y para todo  $s \in S$ .

El algoritmo es el siguiente:

- Inicialización: para  $s \in S$

$$\pi[1, s] = P(s|x_0, x_1, \dots, x_m)$$

donde  $s_0$  es un estado especial "inicial".

- Para  $j \in \{2, \dots, m\}$ ,  $s \in \{1, \dots, k\}$

$$\pi[j, s] = \max_{s' \in S} [\pi[j-1, s'] \times P(s|s', x_1, \dots, x_m)]$$

- Finalmente, después de haber completado los valores de  $\pi[j, s]$  para todos los  $j, s$ , podemos calcular

$$\max_{s_1, \dots, s_m} = \max_s \pi[m, s].$$

- El algoritmo se ejecuta en tiempo  $O(mk^2)$  (es decir, lineal en la longitud de la secuencia  $m$ , y cuadrático en el número de etiquetas  $k$ ).
- Al igual que en el algoritmo de Viterbi para HMM, podemos calcular la secuencia con el puntaje más alto utilizando punteros inversos en el algoritmo de programación dinámica.

## 8.19. Comparación entre MEMMs y HMMs

- Entonces, ¿cuál es la motivación para usar MEMMs en lugar de HMMs?
- Observa que los algoritmos de decodificación Viterbi para los dos modelos son muy similares.

- En MEMMs, la probabilidad asociada con cada transición de estado  $s_{i-1}$  a  $s_i$  es

$$P(s_i|s_{i-1}, x_1, \dots, x_m) = \frac{\exp(\vec{w} \cdot \vec{\phi}(x_1, \dots, x_m, i, s_{i-1}, s_i))}{\sum_{s' \in S} \exp(\vec{w} \cdot \vec{\phi}(x_1, \dots, x_m, i, s_{i-1}, s'))}$$

- En los HMM, la probabilidad asociada a cada transición es:

$$P(s_i|s_{i-1}, x_1, \dots, x_m) = P(s_i|s_{i-1})P(x_i|s_i)$$

- La ventaja clave de MEMMs es que el uso de vectores de características  $\vec{\phi}$  permite obtener representaciones mucho más ricas que las utilizadas en los HMM.
- Por ejemplo, la probabilidad de transición puede ser sensible a cualquier palabra en la secuencia de entrada  $x_1, \dots, x_m$ .
- Además, es muy fácil introducir características que sean sensibles a las características ortográficas (por ejemplo, prefijos o sufijos) de la palabra actual  $x_i$ , o de las palabras circundantes.
- Estas características son útiles en muchas aplicaciones de PNL, y son difíciles de incorporar dentro de HMMs de una manera limpia.

## 8.20. Campos Aleatorios Condicionales (CRFs)

- Ahora pasamos a hablar de Campos Aleatorios Condicionales (CRFs) [Lafferty et al., 2001].
- Notación: para mayor comodidad, usaremos  $x_{1:m}$  para referirnos a una secuencia de entrada  $x_1, \dots, x_m$ , y  $s_{1:m}$  para referirnos a una secuencia de etiquetas  $s_1, \dots, s_m$ .
- El conjunto de todas las etiquetas posibles es nuevamente  $S$ .
- El conjunto de todas las posibles secuencias de etiquetas es  $S^m$ .
- En los campos aleatorios condicionales construiremos un modelo de

$$P(s_1, \dots, s_m | x_1, \dots, x_m) = P(s_{1:m} | x_{1:m})$$

- Una primera idea clave en los CRFs será definir un vector de características que mapea una secuencia de entrada completa  $x_{1:m}$  emparejada con una secuencia de etiquetas completa  $s_{1:m}$  a un vector de características de  $d$  dimensiones:

$$\vec{\Phi}(x_{1:m}, s_{1:m}) \in \mathbb{R}^d$$

- Pronto daremos una definición concreta para  $\vec{\Phi}$ .
- Por ahora, asumamos que existe alguna definición.
- A menudo nos referiremos a  $\vec{\Phi}$  como un vector de características "global".
- Es global en el sentido de que tiene en cuenta toda la secuencia de estados.
- En los CRFs construimos un modelo log-lineal gigante:

$$P(s_{1:m}|x_{1:m}; \vec{w}) = \frac{\exp(\vec{w} \cdot \vec{\Phi}(x_{1:m}, s_{1:m}))}{\sum_{s'_{1:m} \in S^m} \exp(\vec{w} \cdot \vec{\Phi}(x_{1:m}, s'_{1:m}))}$$

- Este es "solo" otro modelo log-lineal, pero es "gigante".
- El espacio de posibles valores para  $s_{1:m}$  es enorme  $S^m$ .
- La constante de normalización (denominador en la expresión anterior) implica una suma sobre todas las posibles secuencias de etiquetas  $S^m$ .
- Estos problemas podrían parecer causar graves problemas computacionales.
- Bajo suposiciones apropiadas, podemos entrenar y decodificar de manera eficiente con este tipo de modelo.
- Definimos el vector de características global  $\vec{\Phi}(x_{1:m}, s_{1:m})$  de la siguiente manera:

$$\vec{\Phi}(x_{1:m}, s_{1:m}) = \sum_{j=1}^m \vec{\phi}(x_{1:m}, j, s_{j-1}, s_j)$$

donde  $\vec{\phi}(x_{1:m}, j, s_{j-1}, s_j)$  es igual a los vectores de características utilizados en los MEMMs.

- Ejemplo:  $\vec{\Phi}([\text{the}, \text{dog}, \text{barks}], \text{DET}, \text{NOUN}, \text{VERB}) = \vec{\phi}([\text{the}, \text{dog}, \text{barks}], 1, *, \text{DET}) + \vec{\phi}([\text{the}, \text{dog}, \text{barks}], 2, \text{DET}, \text{NOUN}) + \vec{\phi}([\text{the}, \text{dog}, \text{barks}], 3, \text{NOUN}, \text{VERB})$
- Esencialmente, estamos sumando muchos vectores dispersos.

**Ejemplo** <sup>4</sup>Fuente: [http://people.ischool.berkeley.edu/~dbamman/nlpF18/slides/12\\_neural\\_sequence\\_labeling.pdf](http://people.ischool.berkeley.edu/~dbamman/nlpF18/slides/12_neural_sequence_labeling.pdf)

- Suponemos que, para cualquier dimensión de  $\vec{\Phi}_{[k]}$ ,  $k = 1, \dots, d$ , el  $k$ -ésimo atributo global es:

$$\vec{\Phi}(x_{1:m}, s_{1:m})_{[k]} = \sum_{j=1}^m \vec{\phi}(x_{1:m}, j, s_{j-1}, s_j)_{[k]}$$

|                        | will | to | fight | $\Phi(x, \text{NN TO VB})$ |
|------------------------|------|----|-------|----------------------------|
| $\phi(x, 1, y_1, y_0)$ | 1    | 0  | 0     | 1                          |
| $\phi(x, 2, y_2, y_1)$ | 1    | 0  | 0     | 1                          |
| $\phi(x, 3, y_3, y_2)$ | 0    | 0  | 0     | 0                          |
| ...                    |      |    |       |                            |
| $\phi(x, 4, y_4, y_3)$ | 0    | 1  | 0     | 1                          |
| $\phi(x, 5, y_5, y_4)$ | 0    | 1  | 0     | 1                          |
| $\phi(x, 6, y_6, y_5)$ | 0    | 0  | 0     | 0                          |
| ...                    |      |    |       |                            |
| $\phi(x, 7, y_7, y_6)$ | 0    | 0  | 1     | 1                          |
| $\phi(x, 8, y_8, y_7)$ | 0    | 0  | 1     | 1                          |
| $y_{i-1}=\text{TO}$    |      |    |       |                            |

Figura 8.3: CRF Example

- Por lo tanto,  $\vec{\Phi}(x_{1:m}, s_{1:m})_{[k]}$  se calcula sumando el vector de características "local"  $\vec{\phi}(x_{1:m}, j, s_{j-1}, s_j)_{[k]}$  sobre las  $m$  transiciones de etiquetas diferentes en  $s_1, \dots, s_m$ .
- Esperaríamos que cada vector local codifique información relevante sobre la transición de etiquetas activando algunas dimensiones del vector (estableciendo el valor en uno).
- Ahora pasamos a dos problemas prácticos críticos en los CRFs: primero, la decodificación, y segundo, la estimación de parámetros (entrenamiento).

## 8.21. Decodificación con CRFs

- El problema de decodificación en los CRFs es el siguiente.
- Dada una secuencia de entrada  $x_{1:m} = x_1, x_2, \dots, x_m$ , nos gustaría encontrar la secuencia de estados subyacente más probable bajo el modelo, es decir,

$$\begin{aligned}
\arg \max_{s_{1:m} \in S^m} P(s_{1:m} | x_{1:m}; \vec{w}) &= \arg \max_{s_{1:m} \in S^m} \frac{\exp(\vec{w} \cdot \vec{\Phi}(x_{1:m}, s_{1:m}))}{\sum_{s'_{1:m} \in S^m} \exp(\vec{w} \cdot \vec{\Phi}(x_{1:m}, s'_{1:m}))} \\
&= \arg \max_{s_{1:m} \in S^m} \exp(\vec{w} \cdot \vec{\Phi}(x_{1:m}, s_{1:m})) \\
&= \arg \max_{s_{1:m} \in S^m} \vec{w} \cdot \vec{\Phi}(x_{1:m}, s_{1:m}) \\
&= \arg \max_{s_{1:m} \in S^m} \vec{w} \cdot \sum_{j=1}^m \vec{\phi}(x_{1:m}, j, s_{j-1}, s_j) \\
&= \arg \max_{s_{1:m} \in S^m} \sum_{j=1}^m \vec{w} \cdot \vec{\phi}(x_{1:m}, j, s_{j-1}, s_j)
\end{aligned} \tag{8.5}$$

- Hemos demostrado que encontrar la secuencia más probable bajo el modelo es equivalente a encontrar la secuencia que maximiza:

$$\arg \max_{s_{1:m} \in S^m} \sum_{j=1}^m \vec{w} \cdot \vec{\phi}(x_{1:m}, j, s_{j-1}, s_j)$$

- Este problema tiene una intuición clara. Cada transición de la etiqueta  $s_{j-1}$  a la etiqueta  $s_j$  tiene un puntaje asociado:  $\vec{w} \cdot \vec{\phi}(x_{1:m}, j, s_{j-1}, s_j)$ .
- Este puntaje podría ser positivo o negativo.
- Intuitivamente, este puntaje será relativamente alto si la transición de estados es plausible, relativamente bajo si esta transición es implausible.
- El problema de decodificación consiste en encontrar una secuencia completa de estados tal que la suma de los puntajes de transición sea maximizada.
- Podemos resolver este problema utilizando una variante del algoritmo de Viterbi, de manera muy similar al algoritmo de decodificación para HMM o MEMM.

## 8.22. Estimación de Parámetros en CRFs (Entrenamiento)

- Para la estimación de parámetros, asumimos que tenemos un conjunto de  $n$  ejemplos etiquetados,  $\{(x_{1:m}^i, s_{1:m}^i)\}_{i=1}^n$ . Cada  $x_{1:m}^i$  es una secuencia de entrada  $x_1^i, \dots, x_m^i$  y cada  $s_{1:m}^i$  es una secuencia de etiquetas  $s_1^i, \dots, s_m^i$ .

- Nuevamente, establecemos la log-verosimilitud negativa (o entropía cruzada) como la función de pérdida  $L$  y optimizamos los parámetros utilizando el descenso de gradiente.
- El principal desafío aquí es que los cálculos del gradiente  $\frac{\partial L}{\partial \vec{w}_{[k]}}$  implican una suma sobre  $S^m$  (un conjunto muy grande que contiene todas las posibles secuencias de etiquetas).
- Esta suma se puede calcular de manera eficiente utilizando el algoritmo de avance-atrás (Forward-backward algorithm)<sup>5</sup>.
- Este es otro algoritmo de programación dinámica que está estrechamente relacionado con el algoritmo de Viterbi.

## 8.23. CRFs y MEMMs

- Los CRFs y los MEMMs son modelos de etiquetado de secuencias discriminatorios: modelan la probabilidad condicional directamente a través de una función lineal-logarítmica multiclas parametrizada (softmax).
- Los HMM, por otro lado, son modelos generativos.
- En los MEMM, la normalización (denominador del softmax) es local: ocurre en cada paso de la etiqueta (la suma se realiza sobre todos los valores de etiqueta posibles  $S$ ).
- En los CRFs, la normalización es global: la suma se realiza sobre todas las posibles secuencias de etiquetas  $S^m$ .
- Entrenar un MEMM es bastante fácil: simplemente se entrena un modelo log-lineal multiclas para una palabra dada a la etiqueta. Este clasificador se utiliza en cada paso de la palabra para predecir toda la secuencia.
- Entrenar un CRF es más complejo. El objetivo es maximizar la log-probabilidad de la secuencia más probable.

### 8.23.1. CRFs y MEMMs: el problema del sesgo de etiqueta

- Los MEMMs terminan tomando decisiones en cada paso de manera independiente.
- Esto lleva a un problema llamado "sesgo de etiqueta": en algunas configuraciones del espacio de etiquetas, los MEMMs esencialmente ignoran aspectos importantes del contexto.

---

<sup>5</sup><http://www.cs.columbia.edu/~mcollins/fb.pdf>

- Ejemplo: La etiqueta correcta del POS para la oración "will to fight"(voluntad de luchar) es "NN TO VB"<sup>6</sup>.
- Aquí, NN significa "sustantivo", TO significa infinitivo az VB significa "forma base verbal".
- Los modales (MD) aparecen con mucha más frecuencia al comienzo de la oración que los sustantivos (por ejemplo, en preguntas).
- Por lo tanto, la etiqueta "MDrecibirá un puntaje más alto que la etiqueta "NNcuando  $x_0 = \text{"will"}$  :  $P(s_1 = MD | s_0 = *, x_1 = \text{"will"}, ...) > P(s_1 = NN | s_{i-1} = *, x_1 = \text{"will"})$ .
- Pero sabemos que MD + TO es muy raro: "puede comer", "quisiera comer".
- La palabra "to.<sup>es</sup> relativamente determinística (casi siempre tiene la etiqueta TO), por lo que no importa qué etiqueta la preceda.
- Debido a la normalización local de los MEMMs,  $P(s_i = TO | s_{i-1}, x_1, \dots, x_i = \text{"to"}, \dots, x_n)$  siempre será 1 cuando  $x_i = \text{"to"}$ , independientemente del valor de  $s_{i-1}$  (MD o NN).
- Eso significa que nuestra predicción para "to"no puede ayudarnos a desambiguar "will".
- Perdemos la información de que las secuencias MD + TO rara vez ocurren.
- Como consecuencia, es probable que un MEMM etiquete la primera palabra como "MD".
- Los CRFs superan este problema al realizar una normalización global: consideran el puntaje de toda la secuencia antes de normalizarlo y convertirlo en una distribución de probabilidades.

## 8.24. Enlaces

- [http://people.ischool.berkeley.edu/~dbamman/nlpF18/slides/11\\_memm\\_crf.pdf](http://people.ischool.berkeley.edu/~dbamman/nlpF18/slides/11_memm_crf.pdf)
- [http://people.ischool.berkeley.edu/~dbamman/nlpF18/slides/12\\_neural\\_sequence\\_labeling.pdf](http://people.ischool.berkeley.edu/~dbamman/nlpF18/slides/12_neural_sequence_labeling.pdf)
- <https://www.depends-on-the-definition.com/sequence-tagging-lstm-crf/>
- <https://www.quora.com/What-are-the-pros-and-cons-of-these-three-sequence-labeling-methods>

---

<sup>6</sup>Aquí estamos utilizando el conjunto de etiquetas PENN Treebank: <https://www.eecis.udel.edu/~vijay/cis889/ie/pos-set.pdf>

- <https://people.cs.umass.edu/~mccallum/papers/crf-tutorial.pdf>
- [http://www.davidsbatista.net/blog/2017/11/13/Conditional\\_Random\\_Fields](http://www.davidsbatista.net/blog/2017/11/13/Conditional_Random_Fields)



## **Capítulo 9**

# **Redes Neuronales Convolucionales**

### **9.1. Redes Neuronales Convolucionales (CNN) en Procesamiento del Lenguaje Natural (PLN)**

Las redes neuronales convolucionales (CNN) se volvieron muy populares en la comunidad de visión por computadora debido a su éxito en la detección de objetos ("gato", "bicicletas") independientemente de su posición en la imagen. Estas redes identifican predictores locales indicativos en una estructura (por ejemplo, imágenes, oraciones) y los combinan para producir una representación vectorial de tamaño fijo para la estructura. En el procesamiento del lenguaje natural, la CNN captura los n-gramos que son más informativos para la tarea predictiva objetivo. Por ejemplo, en la clasificación de sentimientos, estos aspectos locales corresponden a n-gramos que transmiten sentimiento, como "no está mal." o "muy bueno". La idea fundamental de las CNN [LeCun et al., 1998] es considerar la extracción de características y la clasificación como una tarea conjuntamente entrenada.

### **9.2. Convolución Básica + Agrupamiento**

En el procesamiento del lenguaje natural, las oraciones suelen ser modeladas como secuencias de vectores de palabras. Estos vectores se pueden obtener a partir de incrustaciones de palabras pre-entrenadas o de una capa de incrustación. La CNN aplica funciones no lineales (aprendidas) o "filtros" que mapean ventanas de tamaño  $k$  de palabras a valores escalares. Se pueden aplicar varios filtros, lo que resulta en un vector de dimensión  $l$  (una dimensión por filtro). Los filtros capturan propiedades relevantes de las palabras en la ventana y corresponden a la "capa de convolución" de la red. La capa de "agrupamiento" se utiliza para combinar los vectores resultantes de las diferentes ventanas en un

solo vector de dimensión  $l$ . Esto se logra tomando el valor máximo o el valor promedio observado en cada dimensión en las diferentes ventanas. El objetivo es capturar las características más importantes de la oración, independiente-mente de la posición. El vector resultante de dimensión  $l$  se alimenta luego a una red que se utiliza para la predicción (por ejemplo, softmax). Los gradien-tes se propagan desde la pérdida de la red ajustando los parámetros del filtro. Los filtros aprenden a resaltar los aspectos de los datos (n-gramos) que son importantes para la tarea objetivo.

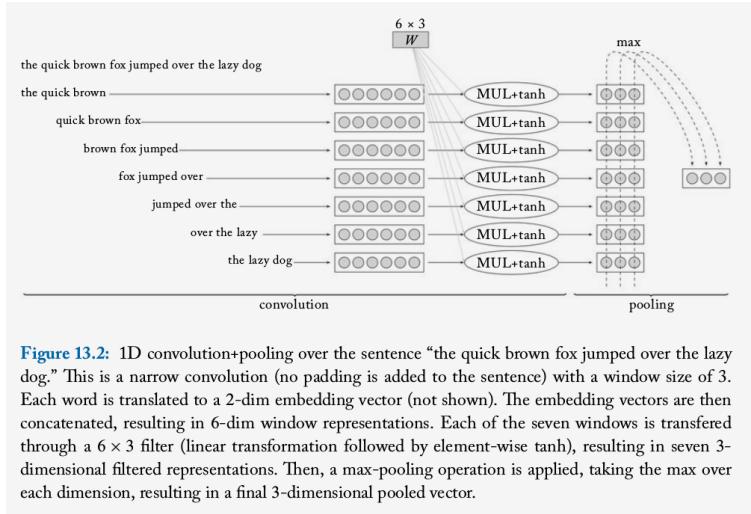


Figura 9.1: Arquitectura básica de una CNN para procesamiento del lenguaje natural.

<sup>1</sup>Fuente: [Goldberg, 2017]

### 9.3. Convoluciones 1D sobre Texto

En el contexto del procesamiento del lenguaje natural, nos centramos en la operación de convolución unidimensional<sup>2</sup>. Consideremos una secuencia de palabras  $w_{1:n} = w_1, \dots, w_n$ , cada una con su vector de palabras de  $d_{emb}$  dimensiones correspondiente  $E_{[w_i]} = \vec{w}_i$ . Una convolución 1D de ancho  $k$  funciona deslizando una ventana de tamaño  $k$  sobre la oración y aplicando el mismo filtro a cada ventana en la secuencia. Un filtro es un producto esca-lar con un vector de pesos  $\vec{u}$ , seguido a menudo de una función de activa-ción no lineal. Definimos el operador  $\oplus(w_{i:i+k-1})$  como la concatenación de los vectores  $\vec{w}_i, \dots, \vec{w}_{i+k-1}$ . El vector concatenado de la ventana  $i$ -ésima es

<sup>2</sup>1D se refiere a una convolución que se aplica a entradas unidimensionales como secuencias, a diferencia de las convoluciones 2D que se aplican a imágenes.

$\vec{x}_i = \oplus(w_{i:i+k-1}) = [\vec{w}_i; \vec{w}_{i+1}; \dots; \vec{w}_{i+k-1}]$ , donde  $x_i \in \mathbb{R}^{k \cdot d_{emb}}$ . Luego, aplicamos el filtro a cada vector de ventana, lo que resulta en valores escalares  $p_i = g(\vec{x}_i \cdot \vec{u})$ , donde  $p_i \in \mathbb{R}$ . Es común usar  $l$  filtros diferentes  $\vec{u}_1, \dots, \vec{u}_l$ , que se pueden organizar en una matriz  $U$ , y a menudo se agrega un vector de sesgo  $\vec{b}$ :  $\vec{p}_i = g(\vec{x}_i \cdot U + \vec{b})$ . Cada vector  $\vec{p}_i$  es una colección de  $l$  valores que representan (o resumen) la  $i$ -ésima ventana ( $\vec{p}_i \in \mathbb{R}^l$ ). Idealmente, cada dimensión captura un tipo diferente de información indicativa. La idea principal detrás de la capa de convolución es aplicar la misma función parametrizada a todos los n-gramos en la secuencia, lo que crea una secuencia de  $m$  vectores, cada uno representando un n-gramo particular en la secuencia. La representación es sensible a la identidad y al orden de las palabras dentro del n-gramo, pero se extraerá la misma representación para un n-gramo independientemente de su posición en la secuencia.

## 9.4. Convoluciones Angostas vs. Amplias

¿Cuántos vectores  $\vec{p}_i$  tenemos? Para una oración de longitud  $n$  con una ventana de tamaño  $k$ , hay  $n - k + 1$  posiciones en las que se puede comenzar la secuencia. Obtenemos  $n - k + 1$  vectores  $\vec{p}_{1:n-k+1}$ . Este enfoque se conoce como **convolución angosta**. Una alternativa es llenar la oración con  $k - 1$  palabras de relleno a cada lado, lo que resulta en  $n + k + 1$  vectores  $\vec{p}_{1:n+k+1}$ . Esto se llama **convolución amplia**.

## 9.5. Agrupamiento Vectorial

Aplicar la convolución sobre el texto da como resultado  $m$  vectores  $\vec{p}_{1:m}$ , cada uno de los cuales es un vector  $\vec{p}_i \in \mathbb{R}^l$ . Estos vectores se combinan (se agrupan) en un solo vector  $\vec{c} \in \mathbb{R}^l$  que representa toda la secuencia. Existen dos operaciones de agrupamiento comunes:

- Max pooling: este operador toma el valor máximo en cada dimensión (es la operación de agrupamiento más común). Para cada dimensión  $j$ , se calcula  $\vec{c}_{[j]} = \max_{1 < i \leq m} \vec{p}_{i[j]}$ , donde  $\vec{p}_{i[j]}$  denota la  $j$ -ésima componente de  $\vec{p}_i$ .
- Average pooling: este operador toma el valor promedio en cada índice. Se calcula  $\vec{c} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \vec{p}_i$ .

Idealmente, el vector  $\vec{c}$  capturará la esencia de la información importante en la secuencia. La naturaleza de la información importante que debe ser codificada en el vector  $\vec{c}$  depende de la tarea. Por ejemplo, si estamos realizando clasificación de sentimientos, la esencia son los n-gramos informativos que indican sentimiento. Durante el entrenamiento, el vector  $\vec{c}$  se alimenta a capas de red adicionales (por ejemplo, una capa de perceptrón multicapa), culminando en una capa de salida que se utiliza para la predicción. El procedimiento de

entrenamiento de la red calcula la pérdida con respecto a la tarea de predicción, y los gradientes de error se propagan hacia atrás a través de las capas de agrupamiento y convolución, así como a través de las capas de incrustación. El proceso de entrenamiento ajusta la matriz de convolución  $U$ , el vector de sesgo  $\vec{b}$ , la red posterior y potencialmente también la matriz de incrustación  $E^3$  de manera que el vector  $\vec{c}$  resultante del proceso de convolución y agrupamiento realmente codifique información relevante para la tarea en cuestión.

## 9.6. Clasificación de Sentimientos en Twitter con CNN

En [Severyn and Moschitti, 2015] se desarrolla una arquitectura de red neuronal convolucional para la clasificación de sentimientos en Twitter. Cada tweet se representa como una matriz cuyas columnas corresponden a las palabras en el tweet, preservando el orden en el que aparecen. Las palabras se representan mediante vectores densos o incrustaciones entrenadas a partir de un gran corpus de tweets no etiquetados utilizando word2vec. La red está formada por las siguientes capas: una capa de entrada con la matriz de tweets dada, una única capa de convolución, una función de activación lineal rectificada (ReLU), una capa de agrupamiento máximo (max pooling) y una capa de clasificación softmax. Los pesos de la red neuronal se pre-entrenan utilizando datos con anotaciones de emoticonos y luego se entrena con los tweets anotados a mano del concurso SemEval. Los resultados experimentales muestran que la fase de pre-entrenamiento permite una inicialización adecuada de los pesos de la red y, por lo tanto, tiene un impacto positivo en la precisión de la clasificación.

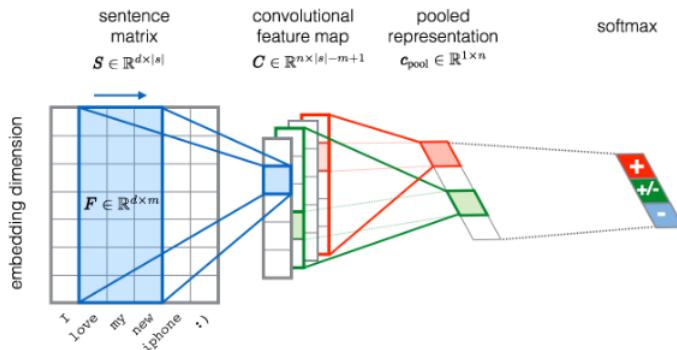


Figura 9.2: Arquitectura CNN para la clasificación de sentimientos en Twitter.

---

<sup>3</sup>Algunas personas dejan fija la capa de incrustación durante el entrenamiento, mientras que otros permiten que los parámetros cambien.

## 9.7. Redes Neuronales Convolucionales Muy Profundas para la Clasificación de Texto

Las arquitecturas de CNN para PLN son bastante superficiales en comparación con las redes neuronales convolucionales profundas que han impulsado el estado del arte en visión por computadora. En [Conneau et al., 2017] se propone una arquitectura de red neuronal para el procesamiento de texto (VDCNN) que opera directamente a nivel de caracteres y utiliza solo convoluciones pequeñas y operaciones de agrupamiento. En lugar de utilizar incrustaciones de palabras, se utilizan incrustaciones de nivel de caracteres. Los caracteres son la representación atómica más baja del texto. El rendimiento de este modelo aumenta con la profundidad: utilizando hasta 29 capas de convolución, los autores informan mejoras sobre el estado del arte en varias tareas públicas de clasificación de texto. Las mejoras más notables se logran en conjuntos de datos grandes. Este fue uno de los primeros trabajos que mostró los beneficios de las arquitecturas neuronales profundas para PLN.

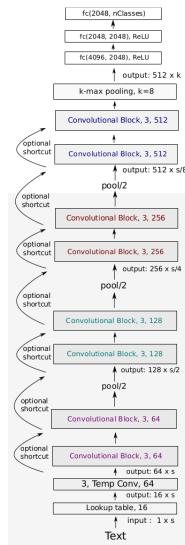


Figura 9.3: Arquitectura VDCNN para la clasificación de texto.



## Capítulo 10

# Redes Neuronales Recurrentes

### 10.1. La Abstracción de las RNN

Si bien las representaciones derivadas de las redes convolucionales ofrecen cierta sensibilidad al orden de las palabras, su sensibilidad al orden se limita principalmente a patrones locales y no tiene en cuenta el orden de patrones que están lejos en la secuencia. Las redes neuronales recurrentes (RNN) permiten representar entradas secuenciales de longitud arbitraria en vectores de tamaño fijo, prestando atención a las propiedades estructuradas de las entradas [Goldberg, 2016]. Las RNN, especialmente aquellas con arquitecturas con compuertas como LSTM y GRU, son muy eficaces para capturar regularidades estadísticas en entradas secuenciales.

Utilizamos  $\vec{x}_{i:j}$  para denotar la secuencia de vectores  $\vec{x}_i, \dots, \vec{x}_j$ . A alto nivel, la RNN es una función que toma como entrada una secuencia ordenada de longitud arbitraria de  $n$  vectores de dimensión  $d_{in}$ ,  $\vec{x}_{1:n} = \vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_n$  ( $\vec{x}_i \in \mathbb{R}^{d_{in}}$ ), y devuelve como salida un solo vector de dimensión  $d_{out}$ ,  $\vec{y}_n \in \mathbb{R}^{d_{out}}$ :

$$\begin{aligned}\vec{y}_n &= \text{RNN}(\vec{x}_{1:n}) \\ \vec{x}_i &\in \mathbb{R}^{d_{in}}, \quad \vec{y}_n \in \mathbb{R}^{d_{out}}\end{aligned}\tag{10.1}$$

Esto define implícitamente un vector de salida  $\vec{y}_i$  para cada prefijo  $\vec{x}_{1:i}$  de la secuencia  $\vec{x}_{i:n}$ . Denotamos por  $RNN^*$  a la función que devuelve esta secuencia:

$$\begin{aligned}\vec{y}_{1:n} &= RNN^*(\vec{x}_{1:n}) \\ \vec{y}_i &= \text{RNN}(\vec{x}_{1:i}) \\ \vec{x}_i &\in \mathbb{R}^{d_{in}}, \quad \vec{y}_n \in \mathbb{R}^{d_{out}}\end{aligned}\tag{10.2}$$

Luego, se utiliza el vector de salida  $\vec{y}_n$  para realizar predicciones adicionales. Por ejemplo, un modelo para predecir la probabilidad condicional de un

evento  $e$  dado la secuencia  $\vec{x}_{1:n}$  se puede definir como el  $j$ -ésimo elemento del vector de salida resultante de la operación softmax sobre una transformación lineal de la codificación RNN:

$$p(e = j | \vec{x}_{1:n}) = \text{softmax}(\text{RNN}(\vec{x}_{1:n}) \cdot W + \vec{b})_{[j]}$$

La función RNN proporciona un marco para condicionar toda la historia sin recurrir a la suposición de Markov que se utiliza tradicionalmente para modelar secuencias. La RNN se define de forma recursiva mediante una función  $R$  que toma como entrada un vector de estado  $\vec{s}_{i-1}$  y un vector de entrada  $\vec{x}_i$ , y devuelve un nuevo vector de estado  $\vec{s}_i$ . Luego, el vector de estado  $\vec{s}_i$  se asigna a un vector de salida  $\vec{y}_i$  mediante una función determinista simple  $O(\cdot)$ . La base de la recursión es un vector de estado inicial  $\vec{s}_0$ , que también es una entrada de la RNN. Por brevedad, a menudo omitimos el vector inicial  $\vec{s}_0$  o asumimos que es el vector cero. Al construir una RNN, al igual que al construir una red de alimentación directa, es necesario especificar la dimensión de las entradas  $\vec{x}_i$ , así como las dimensiones de las salidas  $\vec{y}_i$ :

$$\begin{aligned} \text{RNN}^*(\vec{x}_{1:n}; \vec{s}_0) &= \vec{y}_{1:n} \\ \vec{y}_i &= O(\vec{s}_i) \\ \vec{s}_i &= R(\vec{s}_{i-1}, \vec{x}_i) \\ \vec{x}_i &\in \mathbb{R}^{d_{in}}, \quad \vec{y}_i \in \mathbb{R}^{d_{out}}, \quad \vec{s}_i \in \mathbb{R}^{f(d_{out})} \end{aligned} \tag{10.3}$$

Las funciones  $R$  y  $O$  son las mismas en todas las posiciones de la secuencia. La RNN realiza un seguimiento de los estados de la computación a través del vector de estado  $\vec{s}_i$  que se guarda y se pasa en las invocaciones de  $R$ .

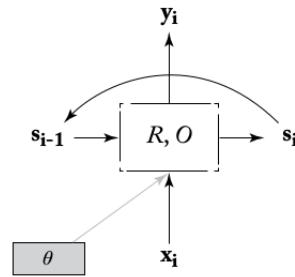


Figura 10.1: Representación gráfica de una RNN.

Esta presentación sigue la definición recursiva y es válida para secuencias de longitud arbitraria. Sin embargo, para una secuencia de entrada de tamaño finito (y todas las secuencias de entrada con las que trabajamos son finitas), se puede desenrollar la recursión.

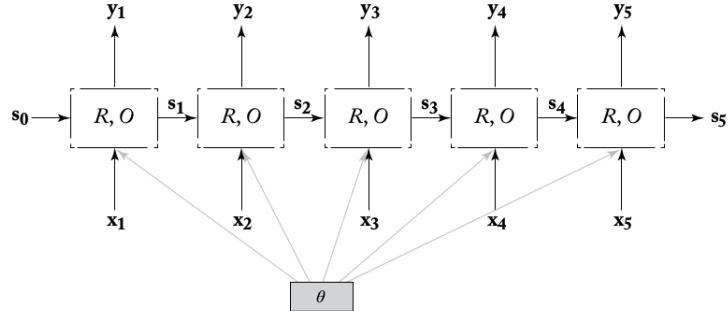


Figura 10.2: Representación gráfica de una RNN desenrollada para una secuencia de longitud finita.

Los parámetros  $\theta$  resaltan el hecho de que los mismos parámetros se comparten en todos los pasos de tiempo. Diferentes instancias de  $R$  y  $O$  darán como resultado estructuras de red diferentes. Observamos que el valor de  $\vec{s}_i$  (y, por lo tanto,  $\vec{y}_i$ ) se basa en toda la entrada  $\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_i$ . Por ejemplo, al expandir la recursión para  $i = 4$  obtenemos:

$$\begin{aligned}
 s_4 &= R(s_3, x_4) \\
 &= R(\overbrace{R(s_2, x_3)}^{s_3}, x_4) \\
 &= R(R(\overbrace{R(s_1, x_2)}^{s_2}, x_3), x_4) \\
 &= R(R(R(\overbrace{R(s_0, x_1)}^{s_1}, x_2), x_3), x_4).
 \end{aligned}$$

Figura 10.3: Representación gráfica de la RNN después de expandir la recursión.

Así,  $\vec{s}_n$  y  $\vec{y}_n$  pueden considerarse como la codificación de toda la secuencia de entrada. El objetivo del entrenamiento de la red es establecer los parámetros de  $R$  y  $O$  de manera que el estado transmita información útil para la tarea que estamos tratando de resolver.

## 10.2. Red Elman o Simple-RNN

Después de describir la abstracción de las RNN, ahora podemos discutir las instancias más simples de estas. Recordemos que estamos interesados en una función recursiva  $\vec{s}_i = R(\vec{x}_i, \vec{s}_{i-1})$  tal que  $\vec{s}_i$  codifique la secuencia  $\vec{x}_{1:n}$ . La formulación más sencilla de una RNN se conoce como Red Elman o Simple-RNN (S-RNN).

$$\begin{aligned}
\vec{s}_i &= R_{SRNN}(\vec{x}_i, \vec{s}_{i-1}) = g(\vec{s}_{i-1}W^s + \vec{x}_iW^x + \vec{b}) \\
\vec{y}_i &= O_{SRNN}(\vec{s}_i) = \vec{s}_i
\end{aligned} \tag{10.4}$$

$\vec{s}_i, \vec{y}_i \in \mathbb{R}^{d_s}, \quad \vec{x}_i \in \mathbb{R}^{d_x}, \quad W^x \in \mathbb{R}^{d_x \times d_s}, \quad W^s \in \mathbb{R}^{d_s \times d_s}, \vec{b} \in \mathbb{R}^{d_s}$

El estado  $\vec{s}_i$  y la entrada  $\vec{x}_i$  se transforman linealmente. Los resultados se suman (junto con un término de sesgo) y luego se pasan a través de una función de activación no lineal  $g$  (comúnmente tangente hiperbólica o ReLU). El Simple-RNN ofrece buenos resultados para etiquetado de secuencias y modelado del lenguaje.

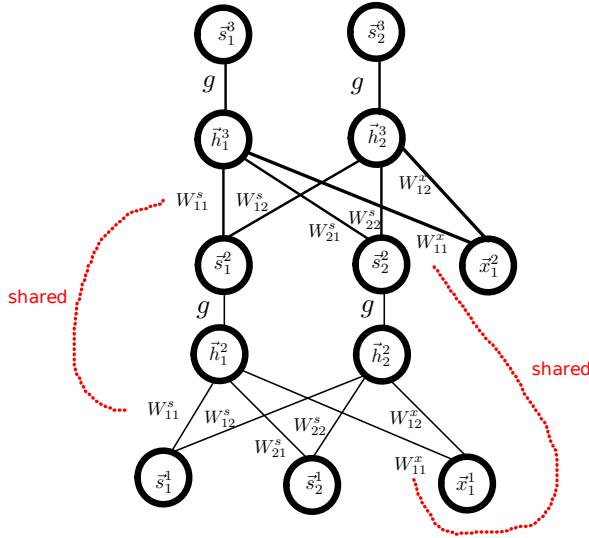


Figura 10.4: Red Elman o Simple-RNN.

### 10.3. Entrenamiento de las RNN

Una RNN desenrollada es simplemente una red neuronal muy profunda. Los mismos parámetros se comparten en muchas partes de la computación y se agrega una entrada adicional en varias capas. Para entrenar una red RNN, se necesita crear el grafo computacional desenrollado para una secuencia de entrada dada, agregar un nodo de pérdida al grafo desenrollado y luego utilizar el algoritmo de retropropagación para calcular los gradientes con respecto a esa pérdida. Este procedimiento se conoce en la literatura de las RNN como retropropagación a través del tiempo (BPTT). La RNN por sí sola no hace mucho, sino que sirve como un componente entrenable en una red más grande. La predicción final y el cálculo de pérdida se realizan en esa red más grande y

el error se retropropaga a través de la RNN. De esta manera, la RNN aprende a codificar propiedades de las secuencias de entrada que son útiles para la tarea de predicción. La señal de supervisión no se aplica directamente a la RNN, sino a través de la red más grande.

## 10.4. Patrones de uso de las RNN: Aceptador

Un patrón común de uso de las RNN es el patrón del aceptador. Este patrón se utiliza para la clasificación de texto, donde la señal de supervisión se basa únicamente en el vector de salida final  $\vec{y}_n$ . El vector de salida de la RNN  $\vec{y}_n$  se alimenta a una capa completamente conectada o un MLP, que produce una predicción. Los gradientes de error luego se retropropagan a través del resto de la secuencia. La pérdida puede tener cualquier forma conocida, como entropía cruzada o hinge, etc.

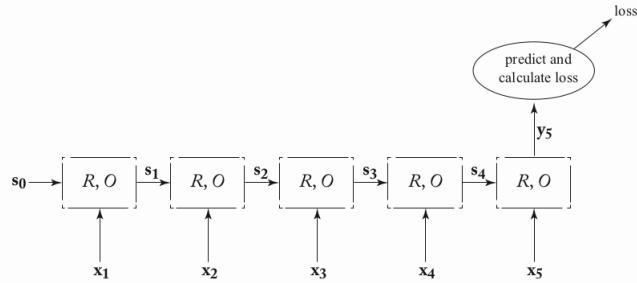


Figura 10.5: Gráfico de entrenamiento de una RNN del tipo aceptador.

Por ejemplo, se puede tener una RNN que lee los caracteres de una palabra uno por uno y luego utiliza el estado final para predecir la categoría gramatical de esa palabra. Otro ejemplo es una RNN que lee una oración y, en función del estado final, decide si transmite un sentimiento positivo o negativo.

## 10.5. Patrones de uso de las RNN: Transductor

Otra opción es tratar la RNN como un transductor, produciendo una salida  $\hat{t}_i$  para cada entrada que lee. Este patrón es muy útil para tareas de etiquetado de secuencias (por ejemplo, etiquetado de partes del discurso, reconocimiento de entidades nombradas, etc.). Se calcula una señal de pérdida local (por ejemplo, entropía cruzada)  $L_{\text{local}}(\hat{t}_i, t_i)$  para cada una de las salidas  $\hat{t}_i$  basada en una etiqueta verdadera  $t_i$ . La pérdida para la secuencia desenrollada será entonces:  $L(\hat{t}_{i:n}, t_{i:n}) = \sum_i L_{\text{local}}(\hat{t}_i, t_i)$ , o utilizando otra combinación en lugar de la suma, como el promedio o un promedio ponderado.

Por ejemplo, un etiquetador de secuencias (por ejemplo, NER, POS), en el que  $\vec{x}_{i:n}$  representa las representaciones de características de las  $n$  palabras de

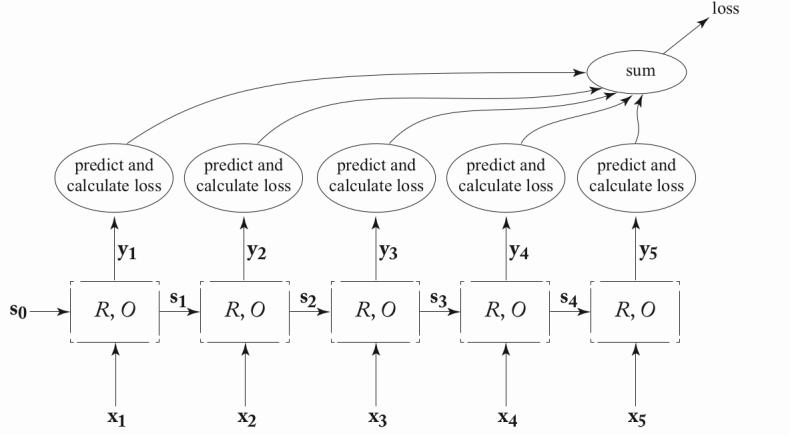


Figura 10.6: Gráfico de entrenamiento de una RNN del tipo transductor.

una oración,  $y_{t_i}$  se utiliza para predecir la asignación de etiquetas de la palabra  $i$  en función de las palabras  $1 : i$ . Otro ejemplo es el modelado de lenguaje, en el que la secuencia de palabras  $x_{1:n}$  se utiliza para predecir una distribución sobre la palabra  $(i + 1)$ -ésima. Los modelos de lenguaje basados en RNN han demostrado tener una perplejidad mucho mejor que los modelos de lenguaje tradicionales.

El uso de las RNN como transductores nos permite relajar la suposición de Markov que se hace tradicionalmente en los modelos de lenguaje y los etiquetadores HMM, y condicionar en todo el historial de predicciones.

## 10.6. Redes neuronales recurrentes bidireccionales (BiRNN)

Una elaboración útil de una RNN es una red neuronal recurrente bidireccional (también conocida como BiRNN). Consideremos la tarea de etiquetado de secuencias en una oración. Una RNN nos permite calcular una función de la  $i$ -ésima palabra  $x_i$  en función de las palabras anteriores  $x_{1:i}$ , incluyendo la palabra actual. Sin embargo, las palabras siguientes  $x_{i+1:n}$  también pueden ser útiles para la predicción. La BiRNN nos permite mirar arbitrariamente lejos tanto al pasado como al futuro dentro de la secuencia. Consideremos una secuencia de entrada  $\vec{x}_{1:n}$ . La BiRNN funciona manteniendo dos estados separados,  $s_i^f$  y  $s_i^b$  para cada posición de entrada  $i$ . El estado hacia adelante  $s_i^f$  se basa en  $\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_i$ , mientras que el estado hacia atrás  $s_i^b$  se basa en  $\vec{x}_n, \vec{x}_{n-1}, \dots, \vec{x}_i$ . Los estados hacia adelante y hacia atrás se generan mediante dos RNN diferentes. La primera RNN ( $R^f, O^f$ ) recibe la secuencia de entrada  $\vec{x}_{1:n}$  tal como está, mientras que la segunda RNN ( $R^b, O^b$ ) recibe la secuencia de entrada en

orden inverso. La representación del estado  $\vec{s}_i$  está compuesta tanto por los estados hacia adelante como por los estados hacia atrás. La salida en la posición  $i$  se basa en la concatenación de los dos vectores de salida:

$$\vec{y}_i = [\vec{y}_i^f; \vec{y}_i^b] = [O^f(s_i^f); O^b(s_i^b)]$$

La salida tiene en cuenta tanto el pasado como el futuro. La codificación biRNN de la palabra  $i$  en una secuencia es la concatenación de dos RNN, una que lee la secuencia desde el principio y otra que la lee desde el final. Definimos  $biRNN(\vec{x}_{1:n}, i)$  como el vector de salida correspondiente a la  $i$ -ésima posición de la secuencia:

$$biRNN(\vec{x}_{1:n}, i) = \vec{y}_i = [RNN^f(\vec{x}_{1:i}); RNN^b(\vec{x}_{n:i})]$$

El vector  $\vec{y}_i$  se puede utilizar directamente para la predicción o se puede alimentar como parte de la entrada a una red más compleja. Mientras que las dos RNN se ejecutan de forma independiente, los gradientes de error en la posición  $i$  fluirán tanto hacia adelante como hacia atrás a través de las dos RNN. Al alimentar el vector  $\vec{y}_i$  a través de un MLP antes de la predicción, se mezclarán aún más las señales hacia adelante y hacia atrás.

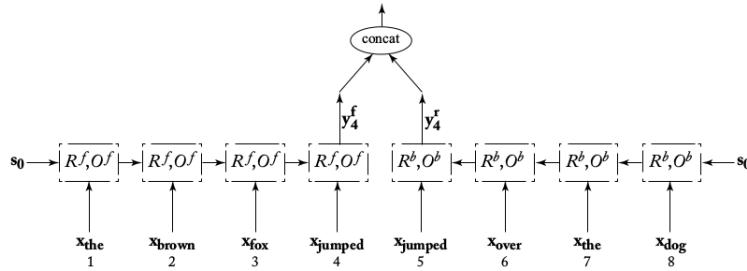


Figura 10.7: Red neuronal recurrente bidireccional (biRNN).

Observa cómo el vector  $\vec{y}_4$ , correspondiente a la palabra **saltó**, codifica una ventana infinita alrededor (e incluyendo) el vector de enfoque  $\vec{x}_{saltó}$ . La biRNN es muy efectiva para tareas de etiquetado, en las que cada vector de entrada corresponde a un vector de salida. También es útil como componente de extracción de características entrenable de propósito general, que se puede utilizar siempre que se requiera una ventana alrededor de una palabra determinada.

## 10.7. Redes neuronales recurrentes multi-capas (apiladas)

Las RNN se pueden apilar en capas, formando una estructura en forma de cuadrícula. Consideremos  $k$  RNN,  $RNN_1, \dots, RNN_k$ , donde la  $j$ -ésima RNN

tiene estados  $\vec{s}_{1:n}^j$  y salidas  $\vec{y}_{1:n}^j$ . La entrada para la primera RNN son  $\vec{x}_{1:n}$ . La entrada de la  $j$ -ésima RNN ( $j \geq 2$ ) son las salidas de la RNN debajo de ella,  $\vec{y}_{1:n}^{j-1}$ . La salida de toda la formación es la salida de la última RNN,  $\vec{y}_{1:n}^k$ . Estas arquitecturas en capas se conocen comúnmente como RNN profundas. No

existe una restricción en la cantidad de capas que se pueden apilar, pero es importante tener en cuenta que agregar más capas puede aumentar la complejidad del modelo y requerir más datos y tiempo de entrenamiento.

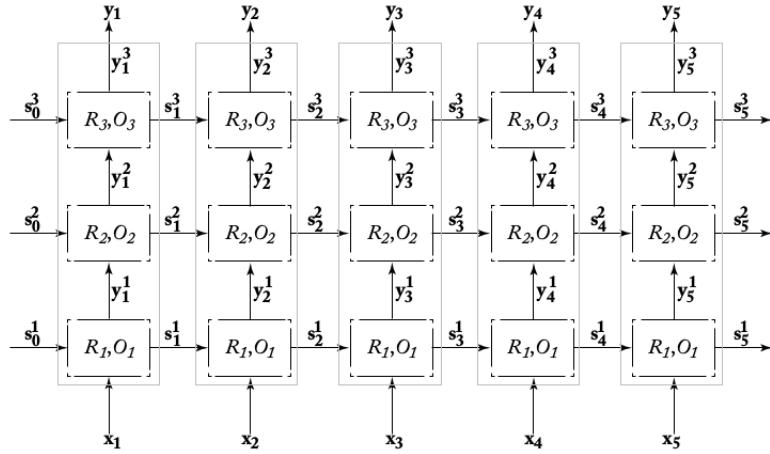


Figura 10.8: Redes neuronales recurrentes multi-capas (apiladas).

La ventaja de las RNN apiladas es que cada capa puede aprender representaciones de características de nivel superior en la secuencia de entrada. Las capas superiores pueden capturar patrones de más largo alcance y dependencias más complejas. Cada capa procesa la secuencia de entrada de manera incremental, y las capas superiores reciben información de las capas inferiores para ayudar a hacer predicciones más precisas. Las RNN apiladas son particularmente efectivas para tareas de modelado del lenguaje y traducción automática.

## 10.8. Arquitecturas con compuertas

Hasta ahora hemos visto solo una instancia de la RNN: la RNN simple (S-RNN) o red Elman. Este modelo es difícil de entrenar efectivamente debido al problema de los **gradientes que desaparecen**. Las señales de error (gradientes) en pasos posteriores de la secuencia disminuyen rápidamente en el proceso de retropropagación, por lo que no llegan a las señales de entrada anteriores, lo que dificulta que la S-RNN capture dependencias a largo plazo. Las arquitecturas basadas en compuertas, como LSTM [Hochreiter and Schmidhuber, 1997] y GRU [Cho et al., 2014], están diseñadas para solucionar esta deficiencia.

Intuitivamente, las redes neuronales recurrentes pueden considerarse como redes de alimentación profunda con parámetros compartidos entre diferentes capas. En el caso de la RNN simple, los gradientes incluyen multiplicaciones repetidas de la matriz  $W$ , lo que hace muy probable que los valores desaparezcan o exploten. El mecanismo de las compuertas mitiga este problema en gran medida al eliminar esta multiplicación repetida de una sola matriz.

Podemos considerar la RNN como un dispositivo de computación de propósito general, donde el estado  $\vec{s}_i$  representa una memoria finita. Cada aplicación de la función  $R$  lee una entrada  $\vec{x}_{i+1}$ , lee la memoria actual  $\vec{s}_i$ , opera en ellas de alguna manera y escribe el resultado en la memoria. Esto resulta en un nuevo estado de memoria  $\vec{s}_{i+1}$ . Sin embargo, un problema aparente con la arquitectura S-RNN es que el acceso a la memoria no está controlado. En cada paso de la computación, se lee todo el estado de memoria y se escribe todo el estado de memoria. ¿Cómo se puede proporcionar un acceso a la memoria más controlado?

Podemos utilizar un vector binario  $\vec{g} \in [0, 1]^n$  que actúa como una **compuerta** para controlar el acceso a vectores de dimensión  $n$  utilizando la operación producto de Hadamard  $\vec{x} \odot \vec{g}$ . La operación Hadamard es la multiplicación elemento a elemento de dos vectores:

$$\vec{x} = \vec{u} \odot \vec{v} \Leftrightarrow \vec{x}_{[i]} = \vec{u}_{[i]} \cdot \vec{v}_{[i]} \quad \forall i \in [1, n]$$

Si consideramos una memoria  $\vec{s} \in \mathbb{R}^d$ , una entrada  $\vec{x} \in \mathbb{R}^d$  y una compuerta  $\vec{g} \in [0, 1]^d$ , la siguiente computación:

$$\vec{s}' \leftarrow \vec{g} \odot \vec{x} + (\vec{1} - \vec{g}) \odot (\vec{s})$$

lee las entradas en  $\vec{x}$  que corresponden a los valores  $\vec{1}$  en  $\vec{g}$  y las escribe en la nueva memoria  $\vec{s}'$ . Las ubicaciones que no se leyeron se copian de la memoria  $\vec{s}$  a la nueva memoria  $\vec{s}'$  mediante el uso de la compuerta  $(\vec{1} - \vec{g})$ .

Este mecanismo de compuerta puede servir como un bloque de construcción en nuestra RNN. Los vectores de compuerta se pueden utilizar para controlar el acceso al estado de memoria  $\vec{s}_i$ . Sin embargo, todavía nos faltan dos componentes importantes (y relacionados): 1) las compuertas no deben ser estáticas, sino que deben estar controladas por el estado de memoria actual y la entrada, y 2) su comportamiento debe ser aprendido.

Esto presenta un obstáculo, ya que el aprendizaje en nuestro marco implica ser diferenciable (debido al algoritmo de retropropagación). Los valores binarios de 0-1 utilizados en las compuertas no son diferenciables. Una solución a este problema es aproximar el mecanismo de compuerta dura con un mecanismo de compuerta suave, pero diferenciable.

Para lograr compuertas diferenciables, reemplazamos el requisito de que  $\vec{g} \in [0, 1]^n$  y permitimos números reales arbitrarios  $\vec{g}' \in \mathbb{R}^n$ . Estos números reales luego pasan a través de una función sigmoide  $\sigma(\vec{g}')$ , lo que limita los valores en el rango  $(0, 1)$ , con la mayoría de los valores cerca de los bordes. Al utilizar la compuerta  $\sigma(\vec{g}') \odot \vec{x}$ , los índices en  $\vec{x}$  que corresponden a valores

cercanos a uno en  $\sigma(g')$  pueden pasar, mientras que los que corresponden a valores cercanos a cero son bloqueados. Los valores de las compuertas pueden condicionarse a la entrada y al estado de memoria actual, y pueden entrenarse utilizando un método basado en gradientes para realizar un comportamiento deseado.

Este mecanismo de compuerta controlable es la base de las arquitecturas LSTM y GRU. En cada paso de tiempo, los mecanismos de compuerta diferenciables deciden qué partes de las entradas se escribirán en la memoria y qué partes de la memoria se sobrescribirán (olvidarán).

## 10.9. LSTM

La arquitectura LSTM (Long Short-Term Memory) [Hochreiter and Schmidhuber, 1997] fue diseñada para resolver el problema de los gradientes que desaparecen. Fue la primera arquitectura en introducir el mecanismo de compuertas. La arquitectura LSTM divide explícitamente el vector de estado  $\vec{s}_i$  en dos mitades: 1) celdas de memoria y 2) memoria de trabajo. Las celdas de memoria están diseñadas para preservar la memoria, así como los gradientes de error, a lo largo del tiempo, y están controladas mediante componentes de compuertas diferenciables. En cada estado de entrada, se utiliza una compuerta para decidir cuánta de la nueva entrada debe escribirse en la celda de memoria y cuánto del contenido actual de la celda de memoria debe olvidarse. Matemáticamente, la arquitectura LSTM se define como:

$$\begin{aligned} s_j &= R_{\text{LSTM}}(s_{j-1}, x_j) = [c_j; h_j] \\ c_j &= f \odot c_{j-1} + i \odot z \\ h_j &= o \odot \tanh(c_j) \\ i &= \sigma(x_j W^{xi} + h_{j-1} W^{hi}) \\ f &= \sigma(x_j W^{xf} + h_{j-1} W^{hf}) \\ o &= \sigma(x_j W^{xo} + h_{j-1} W^{ho}) \\ z &= \tanh(x_j W^{xz} + h_{j-1} W^{hz}) \end{aligned}$$

$$y_j = O_{\text{LSTM}}(s_j) = h_j$$

$$s_j \in \mathbb{R}^{2 \cdot d_h}, \quad x_i \in \mathbb{R}^{d_x}, \quad c_j, h_j, i, f, o, z \in \mathbb{R}^{d_h}, \quad W^{xi} \in \mathbb{R}^{d_x \times d_h}, \quad W^{hi} \in \mathbb{R}^{d_h \times d_h}$$

Figura 10.9: Formulación matemática de la arquitectura LSTM.

El estado en el tiempo  $j$  se compone de dos vectores,  $\vec{c}_j$  y  $\vec{h}_j$ , donde  $\vec{c}_j$  es el componente de memoria y  $\vec{h}_j$  es el componente de estado oculto. Hay tres compuertas,  $\vec{i}$ ,  $\vec{f}$  y  $\vec{o}$ , que controlan la **entrada** (input), **olvido** (forget) y **salida** (output), respectivamente. Los valores de las compuertas se calculan en

función de las combinaciones lineales de la entrada actual  $\vec{x}_j$  y el estado anterior  $\vec{h}_{j-1}$ , pasados a través de una función de activación sigmoide. Se calcula un candidato de actualización  $\vec{z}$  como una combinación lineal de  $\vec{x}_j$  y  $\vec{h}_{j-1}$ , pasados a través de una función de activación tangente hiperbólica (tanh) (para llevar los valores al rango de -1 a 1). Luego, se actualiza la memoria  $\vec{c}_j$ : la compuerta de olvido controla cuánta de la memoria anterior se debe mantener ( $\vec{f} \odot \vec{c}_{j-1}$ ), y la compuerta de entrada controla cuánta de la actualización propuesta se debe mantener ( $\vec{i} \odot \vec{z}$ ). Finalmente, el valor de  $\vec{h}_j$  (que también es la salida  $\vec{y}_j$ ) se determina en función del contenido de la memoria  $\vec{c}_j$ , pasado a través de una no linealidad tangente hiperbólica y controlada por la compuerta de salida. Los mecanismos de compuertas permiten que los gradientes relacionados con la parte de memoria  $\vec{c}_j$  se mantengan altos en rangos de tiempo muy largos.

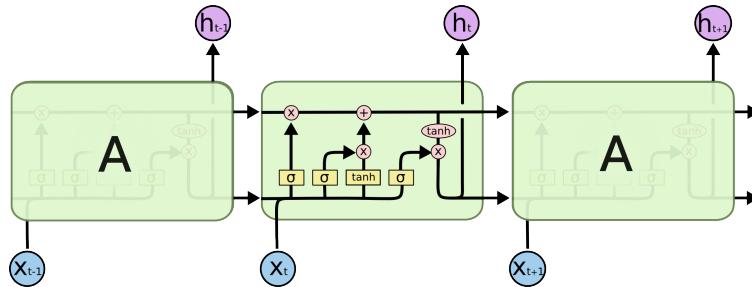


Figura 10.10: Cadena desenrollada de una arquitectura LSTM.

Intuitivamente, las redes neuronales recurrentes pueden considerarse como redes de alimentación profunda con parámetros compartidos entre diferentes capas. En el caso de la RNN simple, los gradientes incluyen multiplicaciones repetidas de la matriz  $W$ , lo que hace que los valores de gradiente desaparezcan o exploten. El mecanismo de las compuertas mitiga este problema en gran medida al eliminar esta multiplicación repetida de una sola matriz. Las LSTMs son actualmente el tipo de arquitectura RNN más exitoso y son responsables de muchos resultados de modelado de secuencias de vanguardia. El principal competidor de la RNN LSTM es la GRU, que se discutirá a continuación.

## 10.10. GRU

La arquitectura LSTM es muy efectiva, pero también bastante complicada. La complejidad del sistema dificulta el análisis y también es computacionalmente costosa de trabajar. El Gated Recurrent Unit (GRU) se introdujo en [Cho et al., 2014] como una alternativa a LSTM. Posteriormente, se demostró en [Chung et al., 2014] que tiene un rendimiento comparable a LSTM en varios

<sup>0</sup>Fuente: <http://colah.github.io/posts/2015-08-Understanding-LSTMs/>

conjuntos de datos (no textuales). Al igual que LSTM, GRU también se basa en un mecanismo de compuerta, pero con sustancialmente menos compuertas y sin un componente de memoria separado.

$$\begin{aligned}
 s_j &= R_{\text{GRU}}(s_{j-1}, x_j) = (1 - z) \odot s_{j-1} + z \odot \tilde{s}_j \\
 z &= \sigma(x_j W^{xz} + s_{j-1} W^{sz}) \\
 r &= \sigma(x_j W^{xr} + s_{j-1} W^{sr}) \\
 \tilde{s}_j &= \tanh(x_j W^{xs} + (r \odot s_{j-1}) W^{sg}) \\
 y_j &= O_{\text{GRU}}(s_j) = s_j \\
 s_j, \tilde{s}_j &\in \mathbb{R}^{d_s}, \quad x_i \in \mathbb{R}^{d_x}, \quad z, r \in \mathbb{R}^{d_s}, \quad W^{xo} \in \mathbb{R}^{d_x \times d_s}, \quad W^{so} \in \mathbb{R}^{d_s \times d_s}.
 \end{aligned}$$

Figura 10.11: Arquitectura GRU.

Se utiliza una sola compuerta  $\vec{r}$  para controlar el acceso al estado anterior  $\vec{s}_{j-1}$  y calcular una actualización propuesta  $\tilde{s}_j$ . El estado actualizado  $\vec{s}_j$  (que también sirve como salida  $y_j$ ) se determina luego en función de una interpolación entre el estado anterior  $\vec{s}_{j-1}$  y la propuesta  $\tilde{s}_j$ . Las proporciones de la interpolación se controlan mediante la compuerta  $z$ . Se ha demostrado que GRU es efectivo en el modelado del lenguaje y la traducción automática. Sin embargo, aún se está investigando y comparando la GRU, la LSTM y posibles arquitecturas de RNN alternativas. Para una exploración empírica de las arquitecturas GRU y LSTM, consulte [Jozefowicz et al., 2015].

## 10.11. Clasificación de sentimientos con RNN

El uso más simple de las RNN es como aceptores: leer una secuencia de entrada y producir una respuesta binaria o multi-clase al final. Las RNN son aprendices de secuencia muy poderosos y pueden captar patrones muy intrincados en los datos. Un ejemplo de oraciones naturalmente positivas y negativas en el dominio de las críticas de películas sería el siguiente: Positiva: "No es afirmativa de la vida, es vulgar y cruel, pero me gustó". Negativa: "Es decepcionante que solo logre ser decente en lugar de brillante".

Observa que el ejemplo positivo contiene algunas frases negativas ("no afirmativa de la vida", "vulgar y cruel"). Mientras que el ejemplo negativo contiene algunas frases positivas ("brillante"). Predecir correctamente el sentimiento requiere entender no solo las frases individuales sino también el contexto en el que ocurren, construcciones lingüísticas como la negación y la estructura general de la oración. La tarea de clasificación de sentimientos a nivel de oración se modela utilizando un RNN-aceptor. Después de la tokenización, la RNN

lee las palabras de la oración una a la vez. Luego, el estado final de la RNN se alimenta a una MLP seguida de una capa softmax con dos salidas (positiva y negativa). La red se entrena con pérdida de entropía cruzada basada en las etiquetas de sentimiento correctas.

$$\begin{aligned} p(\text{etiqueta} = k | \vec{w}_{1:n}) &= \hat{\vec{y}}_{[k]} \\ \hat{\vec{y}} &= \text{softmax}(\text{MLP}(\text{RNN}(\vec{x}_{1:n}))) \\ \vec{x}_{1:n} &= E_{[w_1]}, \dots, E_{[w_n]} \end{aligned} \quad (10.5)$$

La matriz de incrustación de palabras  $E$  se inicializa utilizando incrustaciones pre-entrenadas aprendidas sobre un corpus externo grande utilizando un algoritmo como Word2vec o GloVe con una ventana relativamente amplia. A menudo es útil extender el modelo considerando RNN bidireccionales. Para oraciones más largas, [Li et al., 2015] encontró útil utilizar una arquitectura jerárquica, en la cual la oración se divide en segmentos más pequeños basados en la puntuación. Luego, cada segmento se alimenta a una RNN bidireccional. La secuencia de vectores resultantes (uno para cada segmento) se alimenta luego a un RNN aceptor. Se utilizó una arquitectura jerárquica similar para la clasificación de sentimientos a nivel de documento en [Tang et al., 2015].

## 10.12. Clasificación de sentimientos en Twitter con LSTMS y Emojis

Se propuso un modelo de supervisión remota basado en emojis para detectar sentimientos y otros estados afectivos en mensajes cortos de redes sociales en [Felbo et al., 2017]. Se utilizan emojis como enfoque de supervisión remota para diversas tareas de detección afectiva (por ejemplo, emoción, sentimiento, sarcasmo) utilizando un corpus grande de 634 millones de tweets con 64 emojis. Se pre-entrena una arquitectura de red neuronal con este corpus. La red es una variante de LSTM formada por una capa de incrustación, 2 capas LSTM bidireccionales con conexiones de omisión normales y conexiones de agrupamiento promedio temporal.

Los autores proponen el enfoque de transferencia de deshielo encadenando, en el cual la red pre-entrenada se ajusta finamente para la tarea objetivo. Aquí, cada capa se ajusta finamente individualmente en cada paso con los datos objetivos correctos, y luego todas se ajustan finamente juntas. El modelo logra resultados de vanguardia en la detección de emociones, sentimientos y sarcasmo. La red pre-entrenada se ha publicado para el público en

## 10.13. Bi-LSTM CRF

Un enfoque alternativo al transductor para el etiquetado de secuencias es combinar una BI-LSTM con un Campo Aleatorio Condicional (CRF). Esto pro-

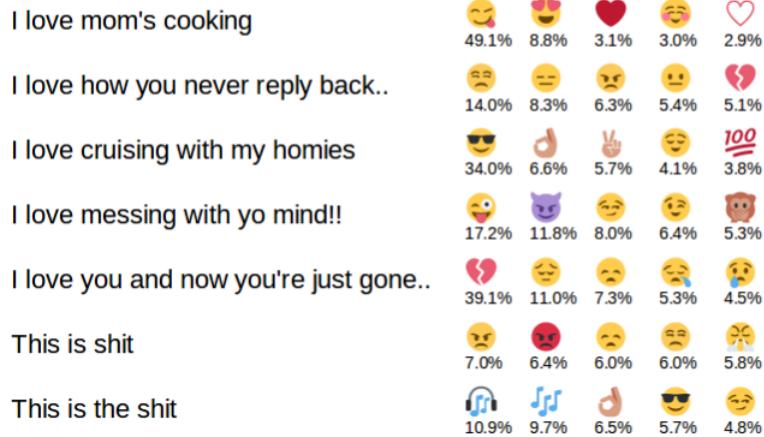


Figura 10.12: Arquitectura de red neuronal para la clasificación de sentimientos en Twitter con LSTMS y emojis (parte 1).

duce un etiquetador poderoso [Huang et al., 2015] llamado BI-LSTM-CRF, en el cual la LSTM actúa como extractor de características y el CRF como una capa especial que modela las transiciones de una etiqueta a otra.

La capa CRF realiza una normalización global sobre todas las posibles secuencias, lo que ayuda a encontrar la secuencia óptima. En un CRF, modelamos la probabilidad condicional de la secuencia de etiquetas de salida dada la secuencia de entrada:

$$P(s_1, \dots, s_m | x_1, \dots, x_m) = P(s_{1:m} | x_{1:m})$$

Lo hacemos definiendo un mapa de características  $\vec{\Phi}(x_{1:m}, s_{1:m}) \in \mathcal{R}^d$  que mapea una secuencia de entrada completa  $x_{1:m}$  junto con una secuencia de etiquetas completa  $s_{1:m}$  a un vector de características de  $d$  dimensiones.

Luego, podemos modelar la probabilidad como un modelo log-lineal con el vector de parámetros  $\vec{w} \in \mathcal{R}^d$ :

$$P(s_{1:m} | x_{1:m}; \vec{w}) = \frac{\exp(\vec{w} \cdot \vec{\Phi}(x_{1:m}, s_{1:m}))}{\sum_{s'_{1:m} \in S^m} \exp(\vec{w} \cdot \vec{\Phi}(x_{1:m}, s'_{1:m}))}$$

donde  $s'_{1:m}$  varía sobre todas las posibles secuencias de salida.

Podemos ver la expresión  $\vec{w} \cdot \vec{\Phi}(x_{1:m}, s_{1:m}) = \text{score}_{crf}(x_{1:m}, s_{1:m})$  como una puntuación de qué tan bien se ajusta la secuencia de etiquetas a la secuencia de entrada dada.

Recordemos de la clase de CRF que  $\vec{\Phi}(x_{1:m}, s_{1:m})$  se creó con características diseñadas manualmente.

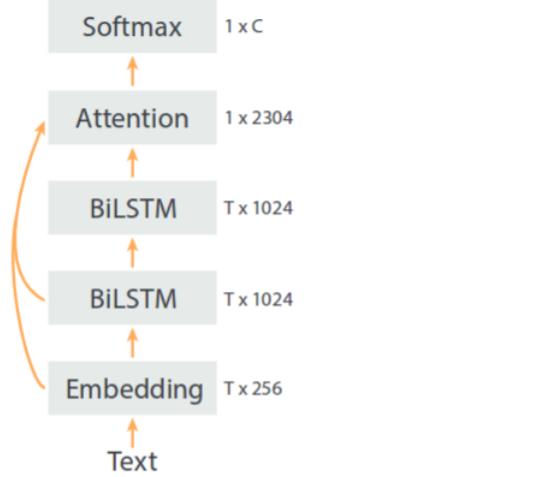


Figura 10.13: Arquitectura de red neuronal para la clasificación de sentimientos en Twitter con LSTMS y emojis (parte 2).

La idea del LSTM CRF es reemplazar  $\vec{\Phi}(x_{1:m}, s_{1:m})$  con la salida de un transductor LSTM (características aprendidas automáticamente):

$$\text{score}_{lstm-crf}(x_{1:m}, s_{1:m}) = \sum_{i=0}^m W_{[s_{i-1}, s_i]} \cdot \text{LSTM}^*(x_{1:m})_{[i]} + \vec{b}[s_{i-1}, s_i]$$

donde  $W_{[s_{i-1}, s_i]}$  corresponde a una puntuación de transición de la etiqueta  $s_{i-1}$  a  $s_i$ ,  $\vec{b}[s_{i-1}, s_i]$  es un término de sesgo para la transición y  $\text{LSTM}^*(x_{1:m})_{[i]}$  proviene del estado oculto de la Bi-LSTM en el paso de tiempo  $i$ .

Todos estos parámetros se aprenden conjuntamente. Observa que la matriz de transición  $W$  no depende de la posición. Se utiliza el algoritmo de avance-retroceso durante el entrenamiento y el algoritmo de Viterbi durante la decodificación. Para obtener más información, consulta <sup>1</sup> y <sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup>[https://pytorch.org/tutorials/beginner/nlp/advanced\\_tutorial.html](https://pytorch.org/tutorials/beginner/nlp/advanced_tutorial.html)

<sup>2</sup><https://www.depends-on-the-definition.com/sequence-tagging-lstm-crf/>

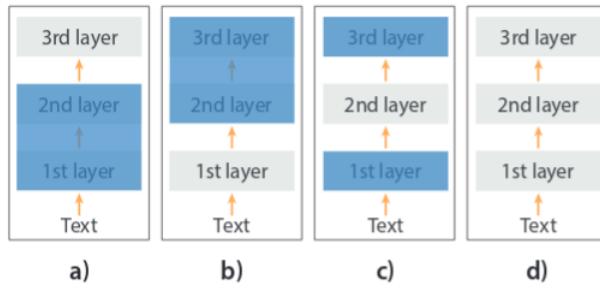


Figure 2: Illustration of the chain-thaw transfer learning approach, where each layer is fine-tuned separately. Layers covered with a blue rectangle are frozen. Step a) tunes any new layers, b) then tunes the 1st layer and c) the next layer until all layers have been fine-tuned individually. Lastly, in step d) all layers are fine-tuned together.

Figura 10.14: Demostración del modelo: <https://deepmoji.mit.edu/>.

## Capítulo 11

# Modelos Secuencia a Secuencia y Atención Neuronal

### 11.1. Modelos de lenguaje y generación de lenguaje

- La modelización del lenguaje es la tarea de asignar una probabilidad a las oraciones en un lenguaje.
- Por ejemplo, ¿cuál es la probabilidad de ver la oración *.el perro perezoso ladró ruidosamente*?
- La tarea se puede formular como la tarea de predecir la probabilidad de ver una palabra condicionada a las palabras anteriores:

$$P(w_i|w_1, w_2, \dots, w_{i-1}) = \frac{P(w_1, w_2, \dots, w_{i-1}, w_i)}{P(w_1, w_2, \dots, w_{i-1})}$$

- Las RNN se pueden utilizar para entrenar modelos de lenguaje vinculando la salida en el tiempo  $i$  con su entrada en el tiempo  $i + 1$ .
- Esta red se puede utilizar para generar secuencias de palabras o frases aleatorias.
- Proceso de generación: predecir una distribución de probabilidad sobre la primera palabra condicionada al símbolo de inicio y seleccionar una palabra aleatoria de acuerdo con la distribución predicha.
- Luego, predecir una distribución de probabilidad sobre la segunda palabra condicionada a la primera, y así sucesivamente, hasta predecir el símbolo de fin de secuencia *</s>*.

- Después de predecir una distribución sobre los siguientes símbolos de salida  $P(t_i = k|t_{1:i-1})$ , se elige un token  $t_i$  y su vector de incrustación correspondiente se alimenta como entrada al siguiente paso.

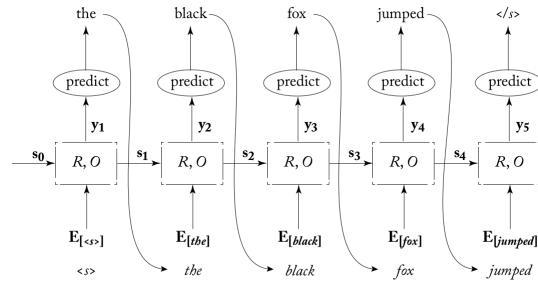


Figura 11.1: Arquitectura de generación de lenguaje con una RNN.

- Teacher-forcing: durante el **entrenamiento**, se alimenta al generador con la palabra anterior verdadera, incluso si su propia predicción le asignó una pequeña probabilidad.
- Es probable que el generador haya generado una palabra diferente en este estado durante la **prueba**.

## 11.2. Problemas de secuencia a secuencia

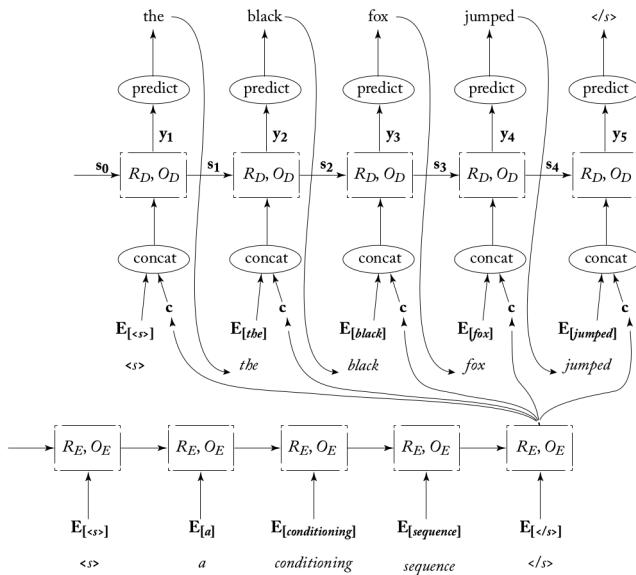
Casi cualquier tarea en NLP se puede formular como un problema de secuencia a secuencia (o generación condicionada), es decir, generar secuencias de salida a partir de secuencias de entrada. Las secuencias de entrada y salida pueden tener longitudes diferentes.

- Traducción automática: de un idioma fuente a un idioma objetivo.
- Resumen: de texto largo a texto corto.
- Diálogo (chatbots): de las intervenciones anteriores a la siguiente intervención.

### 11.2.1. Generación condicionada

- Si bien utilizar la RNN como generador es un ejercicio interesante para demostrar su fortaleza, el verdadero poder del generador de RNN se revela cuando se pasa a una generación condicionada o un marco de codificador-decodificador.
- Idea central: usar dos RNN.

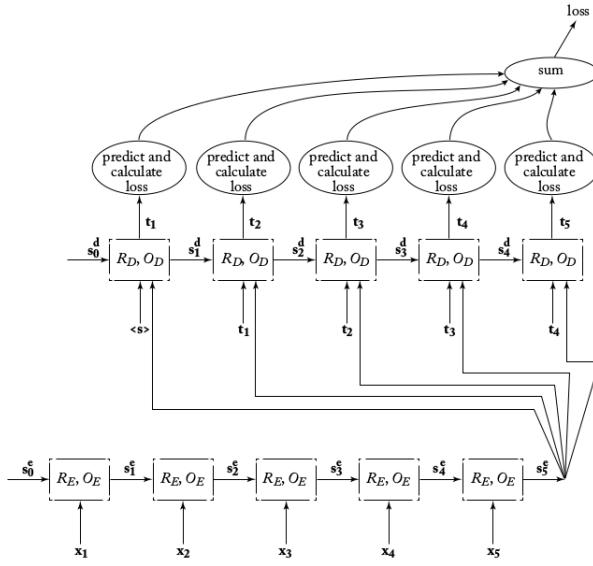
- Codificador: se utiliza una RNN para codificar la entrada fuente en un vector  $\vec{c}$ .
- Decodificador: se utiliza otra RNN para decodificar la salida del codificador y generar la salida objetivo.
- En cada etapa del proceso de generación, el vector de contexto  $\vec{c}$  se concatena a la entrada  $t_j$  y la concatenación se alimenta a la RNN. Marco codificador-decodificador



- Esta configuración es útil para mapear secuencias de longitud  $n$  a secuencias de longitud  $m$ .
- El codificador resume la oración fuente en un vector  $\vec{c}$ .
- Luego, la RNN del decodificador se utiliza para predecir (utilizando un objetivo de modelado del lenguaje) las palabras de la secuencia objetivo condicionadas tanto a las palabras predichas anteriormente como a la oración codificada  $\vec{c}$ .
- Las RNN del codificador y del decodificador se entrena conjuntamente.
- La supervisión solo ocurre para la RNN del decodificador, pero los gradientes se propagan hasta la RNN del codificador.

### Gráfico de entrenamiento de secuencia a secuencia

#### Traducción automática neuronal



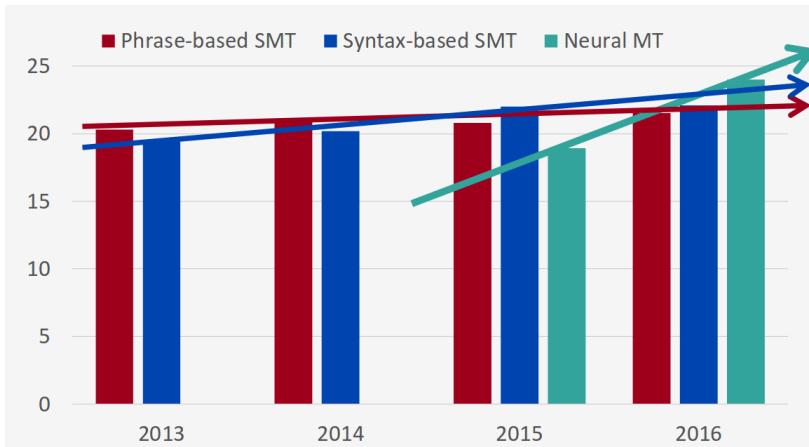
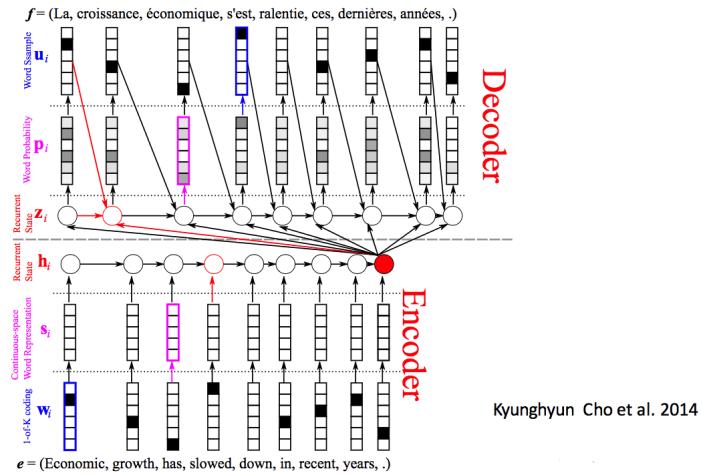
**Progreso de BLEU en traducción automática [Edinburgh En-De WMT]**

### 11.3. Enfoques de decodificación

- El decodificador tiene como objetivo generar la secuencia de salida con la puntuación máxima (o probabilidad máxima), es decir, de modo que se maximice  $\sum_{i=1}^n P(\hat{t}_i | \hat{t}_{1:i-1})$ .
- La naturaleza no markoviana de la RNN significa que la función de probabilidad no se puede descomponer en factores que permitan una búsqueda exacta utilizando la programación dinámica estándar.
- Búsqueda exacta: encontrar la secuencia óptima requiere evaluar todas las secuencias posibles (computacionalmente prohibitivo).
- Por lo tanto, solo tiene sentido resolver aproximadamente el problema de optimización anterior.
- Búsqueda por greedy: elegir la predicción (palabra) de mayor puntuación en cada paso.
- Esto puede dar como resultado una probabilidad global subóptima y llevar a prefijos seguidos de eventos de baja probabilidad.

---

<sup>0</sup>fuente: [http://www.meta-net.eu/events/meta-forum-2016/slides/09\\_sennrich.pdf](http://www.meta-net.eu/events/meta-forum-2016/slides/09_sennrich.pdf)



### 11.3.1. Búsqueda Beam

- La búsqueda Beam interponen entre la búsqueda exacta y la búsqueda greedy al cambiar el tamaño  $K$  de las hipótesis mantenidas durante todo el procedimiento de búsqueda [Cho, 2015].
- El algoritmo de búsqueda Beam funciona en etapas.
- Primero se eligen las  $K$  palabras de inicio con la probabilidad más alta.
- En cada paso, cada secuencia candidata se expande con todas las posibles siguientes etapas.
- Cada paso candidato se puntúa.
- Se conservan las  $K$  secuencias con las probabilidades más probables y se eliminan todas las demás candidatas.

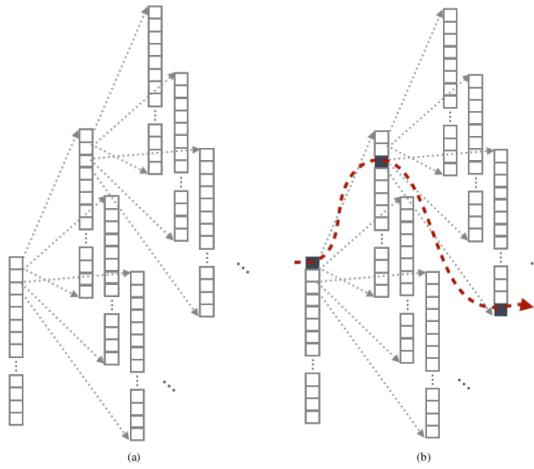


Figure 6.4: (a) Search space depicted as a tree. (b) Greedy search.

Figura 11.2: Búsqueda greedy en la decodificación de secuencia a secuencia.

- El proceso de búsqueda puede detenerse para cada candidato por separado ya sea alcanzando una longitud máxima, alcanzando un token de fin de secuencia o alcanzando una probabilidad umbral.
- Se selecciona la oración con la probabilidad global más alta.

#### 11.4. Generación condicionada con atención

- En las redes codificador-decodificador, la oración de entrada se codifica en un solo vector, que luego se utiliza como contexto de condicionamiento para un generador RNN.
- Esta arquitectura obliga al vector codificado  $\vec{c}$  a contener toda la información requerida para la generación.
- ¡No funciona bien para oraciones largas!
- También requiere que el generador pueda extraer esta información del vector de longitud fija.
- "¡No puedes meter el significado de una maldita oración en un solo maldito vector!Raymond Mooney
- Esta arquitectura se puede mejorar sustancialmente (en muchos casos) mediante la adición de un mecanismo de atención.

---

<sup>0</sup>Más información en: <https://machinelearningmastery.com/beam-search-decoder-natural-language-processing/>

- El mecanismo de atención intenta resolver este problema permitiendo que el decodificador "mire hacia atrás" los estados ocultos del codificador según su estado actual.
- La oración de entrada (una secuencia de entrada de longitud  $n$ ,  $\vec{x}_{1:n}$ ) se codifica utilizando una biRNN como una secuencia de vectores  $\vec{c}_{1:n}$ .
- El decodificador utiliza un mecanismo de atención suave para decidir en qué partes de la entrada codificada debe enfocarse.
- En cada etapa  $j$ , el decodificador ve un promedio ponderado de los vectores  $\vec{c}_{1:n}$ , donde los pesos de atención ( $\bar{\alpha}^j$ ) son elegidos por el mecanismo de atención.

$$\vec{c}^j = \sum_{i=1}^n \bar{\alpha}_{[i]}^j \cdot \vec{c}_i$$

- Los elementos de  $\bar{\alpha}^j$  son todos positivos y suman uno.
- Se producen pesos de atención no normalizados ( $\bar{\alpha}_{[i]}^j$ ) teniendo en cuenta el estado del decodificador en el tiempo  $j$  ( $\vec{s}_j$ ) y cada uno de los vectores  $\vec{c}_i$ .
- Se pueden obtener de varias maneras, básicamente cualquier función diferenciable que devuelva un escalar de dos vectores  $\vec{s}_j$  y  $\vec{c}_i$  se puede utilizar.
- El enfoque más simple es un producto escalar:  $\bar{\alpha}_{[i]}^j = \vec{s}_j \cdot \vec{c}_i$ .
- El que utilizaremos en estas diapositivas es la atención aditiva, que utiliza un perceptrón multicapa:  $\bar{\alpha}_{[i]}^j = \text{MLP}^{\text{att}}([\vec{s}_j; \vec{c}_i]) = \vec{v} \cdot \tanh([\vec{s}_j; \vec{c}_i]U + \vec{b})$
- Luego, estos pesos no normalizados se normalizan en una distribución de probabilidad utilizando la función softmax.

$$\begin{aligned} \text{attend}(\mathbf{c}_{1:n}, \hat{t}_{1:j}) &= c^j \\ c^j &= \sum_{i=1}^n \alpha_{[i]}^j \cdot c_i \\ \alpha^j &= \text{softmax}(\tilde{\alpha}_{[1]}^j, \dots, \tilde{\alpha}_{[n]}^j) \\ \tilde{\alpha}_{[i]}^j &= \text{MLP}^{\text{att}}([\vec{s}_j; c_i]) \end{aligned}$$

- El codificador, el decodificador y el mecanismo de atención se entranan conjuntamente para interactuar bien entre sí.

La generación de toda la secuencia a secuencia con atención se define como:

- ¿Por qué usar el codificador biRNN para traducir la secuencia de condicionamiento  $\vec{x}_{1:n}$  en los vectores de contexto  $\vec{c}_{1:n}$ ?

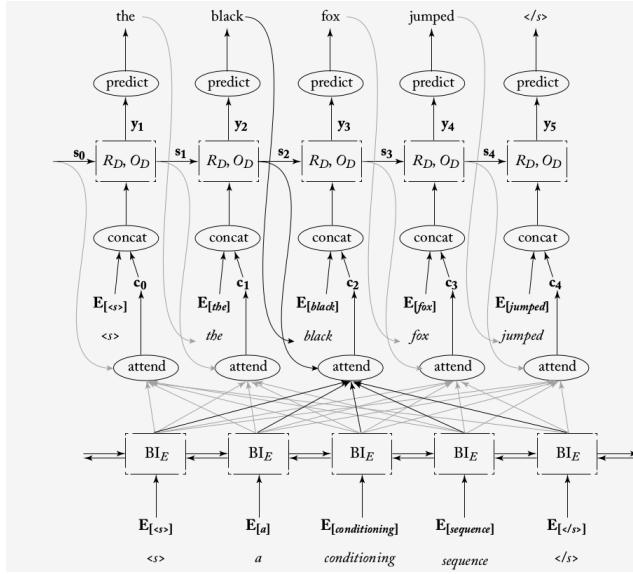


Figura 11.3: Arquitectura de un modelo codificador-decodificador con atención.

- ¿Por qué no simplemente centrarse directamente en las entradas (incrustaciones de palabras)  $MLP^{att}([\vec{s}_j; \vec{x}_i])$ ?
- Podríamos hacerlo, pero obtenemos beneficios importantes del proceso de codificación.
- En primer lugar, los vectores biRNN  $\vec{c}_i$  representan los elementos  $\vec{x}_i$  en su contexto oracional.
- Contexto oracional: una ventana enfocada alrededor del elemento de entrada  $\vec{x}_i$  y no el elemento en sí.
- En segundo lugar, al tener un componente de codificación entrenable que se entrena conjuntamente con el decodificador, el codificador y el decodificador evolucionan juntos.
- Por lo tanto, la red puede aprender a codificar propiedades relevantes de la entrada que son útiles para la decodificación y que pueden no estar presentes en la secuencia fuente  $\vec{x}_{1:n}$  directamente.

## 11.5. Atención y alineaciones de palabras

En el contexto de la traducción automática, se puede pensar que  $MLP^{att}$  calcula una alineación suave entre el estado actual del decodificador  $\vec{s}_j$  (cap-

$$\begin{aligned}
p(t_{j+1} = k \mid \hat{t}_{1:j}, \mathbf{x}_{1:n}) &= f(O_{\text{dec}}(s_{j+1})) \\
s_{j+1} &= R_{\text{dec}}(s_j, [\hat{t}_j; c^j]) \\
c^j &= \sum_{i=1}^n \alpha_{[i]}^j \cdot c_i \\
c_{1:n} &= \text{biRNN}_{\text{enc}}^*(x_{1:n}) \\
\alpha^j &= \text{softmax}(\tilde{\alpha}_{[1]}^j, \dots, \tilde{\alpha}_{[n]}^j) \\
\tilde{\alpha}_{[i]}^j &= \text{MLP}^{\text{att}}([s_j; c_i]) \\
\hat{t}_j &\sim p(t_j \mid \hat{t}_{1:j-1}, \mathbf{x}_{1:n}) \\
f(z) &= \text{softmax}(\text{MLP}^{\text{out}}(z)) \\
\text{MLP}^{\text{att}}([s_j; c_i]) &= v \tanh([s_j; c_i]U + b).
\end{aligned}$$

turando las palabras extranjeras recién producidas) y cada uno de los componentes de la oración fuente  $\vec{c}_i$ .

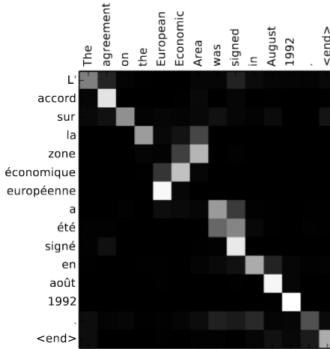


Fig. 2. Visualization of the attention weights  $\alpha_j^t$  of the attention-based neural machine translation model [3]. Each row corresponds to the output symbol, and each column the input symbol. Brighter the higher  $\alpha_j^t$ .

Figura 11.4: Fuente: [Cho et al., 2015]

## 11.6. Otros tipos de atención

## Summary

Below is a summary table of several popular attention mechanisms (or broader categories of attention mechanisms).

| Name                  | Alignment score function                                                                                                                                                                                                          | Citation             |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Additive(*)           | $\text{score}(\mathbf{s}_t, \mathbf{h}_i) = \mathbf{v}_a^\top \tanh(\mathbf{W}_a[\mathbf{s}_t; \mathbf{h}_i])$                                                                                                                    | Bahdanau2015         |
| Location-Base         | $\alpha_{t,i} = \text{softmax}(\mathbf{W}_b \mathbf{s}_t)$<br>Note: This simplifies the softmax alignment max to only depend on the target position.                                                                              | Luong2015            |
| General               | $\text{score}(\mathbf{s}_t, \mathbf{h}_i) = \mathbf{s}_t^\top \mathbf{W}_a \mathbf{h}_i$<br>where $\mathbf{W}_a$ is a trainable weight matrix in the attention layer.                                                             | Luong2015            |
| Dot-Product           | $\text{score}(\mathbf{s}_t, \mathbf{h}_i) = \mathbf{s}_t^\top \mathbf{h}_i$                                                                                                                                                       | Luong2015            |
| Scaled Dot-Product(^) | $\text{score}(\mathbf{s}_t, \mathbf{h}_i) = \frac{\mathbf{s}_t^\top \mathbf{h}_i}{\sqrt{n}}$<br>Note: very similar to the dot-product attention except for a scaling factor; where n is the dimension of the source hidden state. | Vaswani2017          |
| Self-Attention(&)     | Relating different positions of the same input sequence. Theoretically the self-attention can adopt any score functions above, but just replace the target sequence with the same input sequence.                                 | Cheng2016            |
| Global/Soft           | Attending to the entire input state space.                                                                                                                                                                                        | Xu2015               |
| Local/Hard            | Attending to the part of input state space; i.e. a patch of the input image.                                                                                                                                                      | Xu2015;<br>Luong2015 |

(\*) Referred to as "concat" in Luong, et al., 2015 and as "additive attention" in Vaswani, et al., 2017.

(^) It adds a scaling factor  $1/\sqrt{n}$ , motivated by the concern when the input is large, the softmax function may have an extremely small gradient, hard for efficient learning.

(&) Also, referred to as "intra-attention" in Cheng et al., 2016 and some other papers.

Figura 11.5: Fuente: <https://lilianweng.github.io/lil-log/2018/06/24/attention-attention.html>

# Capítulo 12

## Arquitectura de Transformer

### 12.1. What's Wrong with RNNs?

- Given what we just learned on previous lecture, it would seem like attention solves all the problems with RNNs and encoder-decoder architectures<sup>1</sup>.
- There are a few shortcomings of RNNs that another architecture called the **Transformer** tries to address.
- The Transformer discards the recursive component of the Encoder-Decoder architecture and purely relies on attention mechanisms [Vaswani et al., 2017].
- When we process a sequence using RNNs, each hidden state depends on the previous hidden state.
- This becomes a major pain point on GPUs: GPUs have a lot of computational capability and they hate having to wait for data to become available.
- Even with technologies like CuDNN, RNNs are painfully inefficient and slow on the GPU.

#### 12.1.1. Dependencies in neural machine translations

In essence, there are three kinds of dependencies in neural machine translations:

1. Dependencies between the input and output tokens.
2. Dependencies between the input tokens themselves.

---

<sup>1</sup>The following material is based on: <http://mlexplained.com/2017/12/29/attention-is-all-you-need-explained/> and <http://jalammar.github.io/illustrated-transformer/>

### 3. Dependencies between the output tokens themselves.

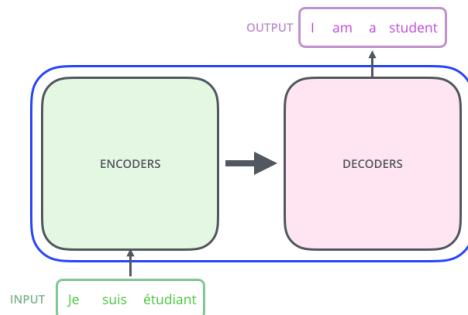
The traditional attention mechanism largely solved the first dependency by giving the decoder access to the entire input sequence. The second and third dependencies were addressed by the RNNs.

## 12.2. The Transformer

- The novel idea of the Transformer is to extend this mechanism to the processing input and output sentences as well.
- The RNN processes input sequences sequentially.
- The Transformer, on the other hand, allows the encoder and decoder to see the entire input sequence all at once.
- This is done using attention.
- Let's begin by looking at the Transformer as a single black box.
- In a machine translation application, it would take a sentence in one language, and output its translation in another.



This blackbox can be decomposed by an encoding component, a decoding component, and connections between them.



- The encoding component is a stack of encoders.
- The original Transformer stacks six of them on top of each other.
- But there's nothing magical about the number six, one can definitely experiment with other arrangements.
- The decoding component is a stack of decoders of the same number.

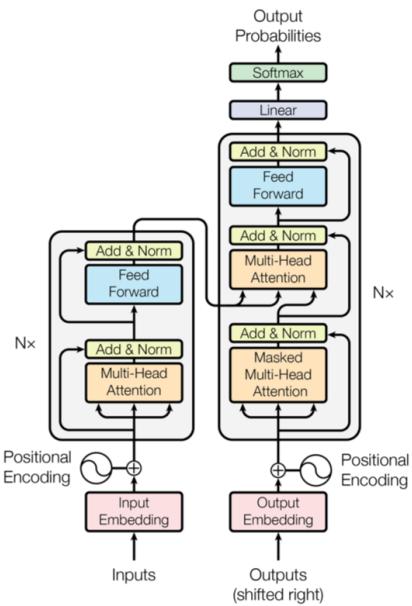
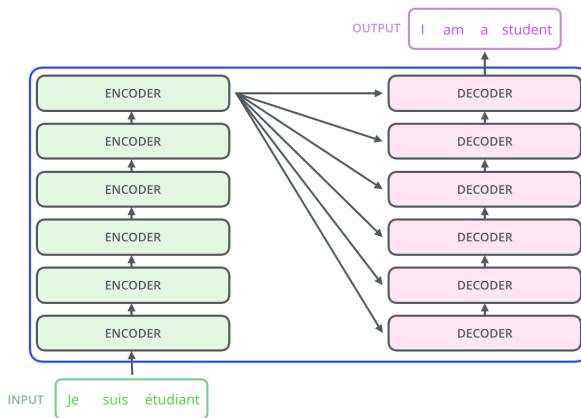
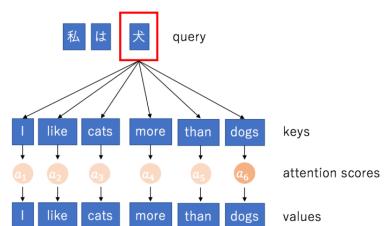


Figure 1: The Transformer - model architecture.

- The Transformer still uses the basic encoder-decoder design of RNN neural machine translation systems.
- The left-hand side is the encoder, and the right-hand side is the decoder.
- The initial inputs to the encoder are the embeddings of the input sequence.
- The initial inputs to the decoder are the embeddings of the outputs up to that point.
- The encoder and decoder are composed of  $N$  blocks (where  $N = 6$  for both networks).
- These blocks are composed of smaller blocks as well.
- Before looking at each block in further detail, let's try to understand the Attention mechanism implemented by the Transformer.

### 12.3. Attention Mechanism in the Transformer

- The attention mechanism in the Transformer is interpreted as a way of computing the relevance of a set of **values** (information) based on some **keys** and **queries**.
- The attention mechanism is used as a way for the model to **focus on relevant information** based on what it is currently processing.
- In the RNN encoder-decoder architecture with attention:
  1. Attention weights were the relevance of the encoder hidden states (values) in processing the decoder state (query).
  2. These values were calculated based on the encoder hidden states (keys) and the decoder hidden state (query).



- In this example, the query is the word being decoded (which means dog) and both the keys and values are the source sentence.

- The attention score represents the relevance, and in this case is large for the word “dog” and small for others.
- When we think of attention this way, we can see that the keys, values, and queries could be anything.
- They could even be the same.
- For instance, both values and queries could be input embeddings (self attention).

### 12.3.1. Queries

- Queries are representations of the target or output sequence that the Transformer model uses to determine how much attention should be given to each word in the input sequence.
- Each word or token in the output sequence is associated with a query.
- The queries help in retrieving relevant information from the input sequence.
- Example: If we are generating the translation for the sentence “Je adore les chats” (meaning I love cats in French), each word in the output sequence would have its corresponding query representation.
- For example, “Je” would have a query vector, “adore” would have a query vector, and so on.

### 12.3.2. Keys

- Keys are representations of the input sequence that the Transformer model uses to compute the attention scores.
- Each word or token in the input sequence is associated with a key.
- These keys capture the information needed to understand the context and relationships between words in the sequence.
- Example: Consider the input sequence: “I love cats.”
- Each word in the sequence would have its corresponding key representation, such as “I” having a key vector, “love” having a key vector, and so on.

### 12.3.3. Values

- Values are the actual information or features associated with each word in the input sequence.
- These values are used to calculate the weighted sum during the attention computation, which helps determine the importance or relevance of each word.
- Example: Considering the same input sequence “I love cats,” each word would have its associated value representation.
- These values contain the contextual information for each word.
- For instance, “I” would have a value vector, “love” would have a value vector, and so forth.
- Keys and values are very difficult to distinguish at first sight because in RNN encoding and decoding with classical attention they are the same.
- We will see with the Transformer that although they come from the same sequence, they may correspond to different vectors.

### 12.3.4. Scaled Dot Product Attention

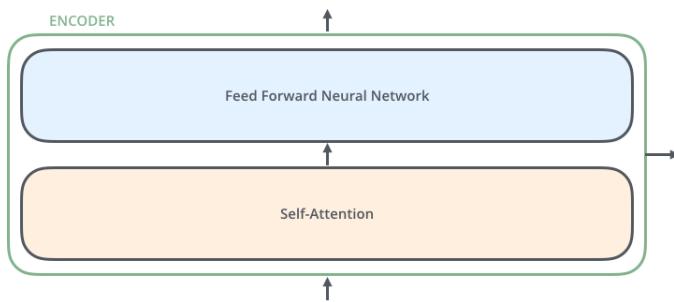
- Transformer uses a particular form of attention called the “Scaled Dot-Product Attention”:
- For a given query vector  $\vec{q}$ , a sequence of key vectors  $\vec{k}_{1:m}$ , and a sequence of value vectors  $\vec{v}_{1:m}$ , the attention weights  $\alpha_1, \dots, \alpha_m$  are computed as follows:
$$\alpha_1, \dots, \alpha_m = \text{softmax} \left( \frac{\vec{q} \cdot \vec{k}_1}{\sqrt{d}}, \dots, \frac{\vec{q} \cdot \vec{k}_m}{\sqrt{d}} \right)$$
- $d$  represents the dimensionality of the queries and keys.
- The normalization over  $\sqrt{d}$  is used to rescale the dot products between queries and keys (dot products tend to grow with the dimensionality).
- The attention weights are then multiplied by their corresponding values to compute a weighted sum, which is then passed to the subsequent layers of the network:

$$\alpha_1 * \vec{v}_1 + \dots + \alpha_m * \vec{v}_m$$

- Now we are ready to take a closer look at each part of the Transformer.

## 12.4. The Encoder

- The encoder contains self-attention layers.
- In a self-attention layer all of the keys, values and queries come from the same place, in this case, the output of the previous layer in the encoder.
- Each position in the encoder can attend to all positions in the previous layer of the encoder.
- The encoder is composed of two blocks (which we will call sub-layers to distinguish from the  $N$  blocks composing the encoder and decoder).
- One is the Multi-Head Attention sub-layer over the inputs, mentioned above.
- The other is a simple feed-forward network.

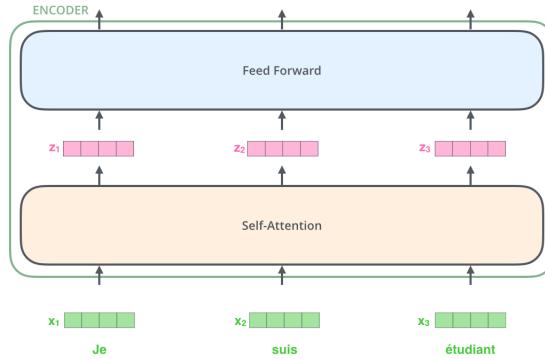


### Bringing The Tensors Into The Picture

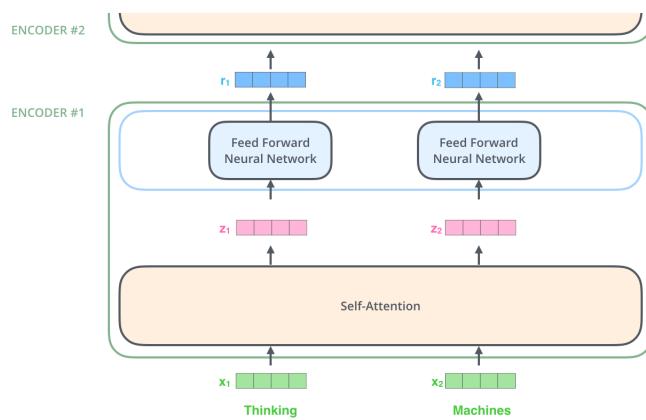
- We begin by turning each input word into a vector using an embedding layer of the size 512 in the bottom-most encoder.



- In the bottom encoder that would be the word embeddings, but in other encoders, it would be the output of the encoder that's directly below.
- The size of this list is hyperparameter we can set – basically it would be the length of the longest sentence in our training dataset.

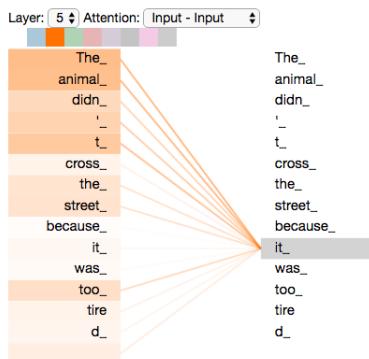


- The word in each position flows through its own path in the encoder.
- There are dependencies between these paths in the self-attention layer.
- The feed-forward layer does not have those dependencies.
- However, and thus the various paths can be executed in parallel while flowing through the feed-forward layer.
- Now We're Encoding!: As we've mentioned already, an encoder receives a list of vectors as input.
- It processes this list by passing these vectors into a 'self-attention' layer, then into a feed-forward neural network, then sends out the output upwards to the next encoder.



## 12.5. Self-Attention at a High Level

- Say the following sentence is an input sentence we want to translate:  
**“The animal didn’t cross the street because it was too tired”**
- What does “it” in this sentence refer to?
- Is it referring to the street or to the animal?
- It’s a simple question to a human, but not as simple to an algorithm.
- When the model is processing the word “it”, self-attention allows it to associate “it” with “animal”.
- As the model processes each word (each position in the input sequence), self attention allows it to look at other positions in the input sequence for clues that can help lead to a better encoding for this word.
- Think of how maintaining a hidden state allows an RNN to incorporate its representation of previous words/vectors it has processed with the current one it’s processing.
- Self-attention is the method the Transformer uses to bake the “understanding” of other relevant words into the one we’re currently processing.

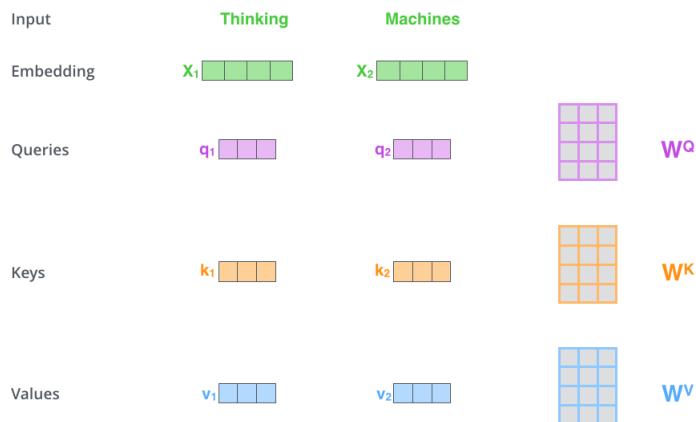


## 12.6. Self-Attention in Detail

### step 1

- The **first step** in calculating scaled dot product self-attention is to create three vectors from each of the encoder’s input vectors (in this case, the embedding of each word).

- So for each word, we create a Query vector, a Key vector, and a Value vector.
- These vectors are created by multiplying the embedding by three matrices that we trained during the training process.
- Notice that these new vectors are smaller in dimension than the embedding vector.
- Their dimensionality is 64, while the embedding and encoder input/output vectors have dimensionality of 512.
- They don't HAVE to be smaller, this is an architecture choice to make the computation of multiheaded attention (mostly) constant.

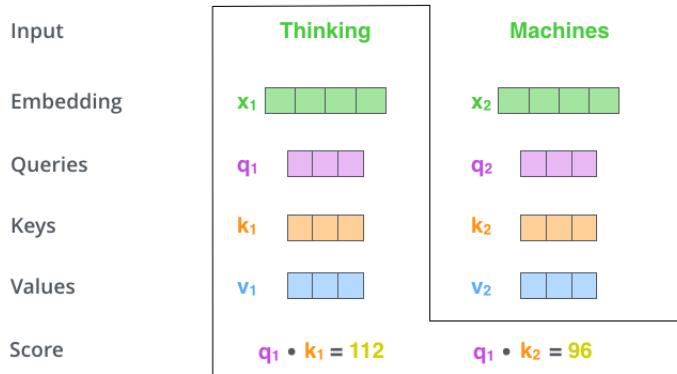


- Example sentence: “Thinking Machines”.
- Multiplying  $x_1$  by the  $W^Q$  weight matrix produces  $q_1$ , the “query” vector associated with that word.
- We end up creating a “query”, a “key”, and a “value” projection of each word in the input sentence.

## Step 2

- The **second step** in calculating self-attention is to calculate a score.
- Say we're calculating the self-attention for the first word in this example, “Thinking”.
- We need to score each word of the input sentence against this word.
- The score determines how much focus to place on other parts of the input sentence as we encode a word at a certain position.

- The score is calculated by taking the dot product of the **query vector** with the **key vector** of the respective word we're scoring.
- So if we're processing the self-attention for the word in position #1, the first score would be the dot product of  $q_1$  and  $k_1$ .
- The second score would be the dot product of  $q_1$  and  $k_2$ .



### Steps 3 and 4

- The **third** and **fourth** steps are to divide the scores by 8 (the square root of the dimension of the key vectors used in the paper – 64).
- This leads to having more stable gradients.
- There could be other possible values here, but this is the default), then pass the result through a softmax operation.
- Softmax normalizes the scores so they're all positive and add up to 1.
- This softmax score determines how much each word will be expressed at the current position.
- Clearly the word at the current position will have the highest softmax score, but sometimes it's useful to attend to another word that is relevant to the current word.

### Self-Attention in Detail: steps 5 and 6

- The **fifth step** is to multiply each value vector by the softmax score (in preparation to sum them up).
- The intuition here is to keep intact the values of the word(s) we want to focus on, and drown-out irrelevant words (by multiplying them by tiny numbers like 0.001, for example).

| Input                        | Thinking              | Machines             |
|------------------------------|-----------------------|----------------------|
| Embedding                    | $x_1$                 | $x_2$                |
| Queries                      | $q_1$                 | $q_2$                |
| Keys                         | $k_1$                 | $k_2$                |
| Values                       | $v_1$                 | $v_2$                |
| Score                        | $q_1 \cdot k_1 = 112$ | $q_1 \cdot k_2 = 96$ |
| Divide by 8 ( $\sqrt{d_k}$ ) | 14                    | 12                   |
| Softmax                      | 0.88                  | 0.12                 |

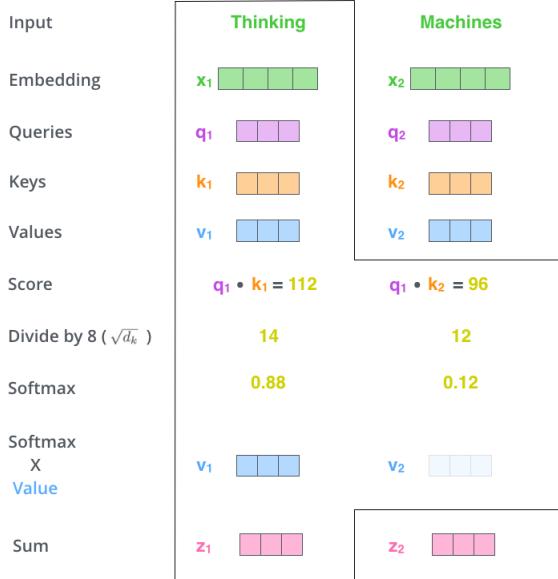
- The **sixth step** is to sum up the weighted value vectors.
- This produces the output of the self-attention layer at the current position (for the first word in this example).
- That concludes the scaled dot product self-attention calculation.
- The resulting vector is one we can send along to the feed-forward neural network.

## 12.7. Matrix Calculation of Self-Attention

- In the actual implementation, scaled dot product self-attention is computed in matrix form for faster processing.
- So let's look at that now that we've seen the intuition of the calculation on the word level.
- The first step is to calculate the Query, Key, and Value matrices:  $Q$ ,  $K$ ,  $V$ .
- We do that by packing our embeddings into a matrix  $X$ , and multiplying it by the weight matrices we've trained ( $WQ$ ,  $WK$ ,  $WV$ ).

$$\text{Attention}(Q, K, V) = \text{softmax} \left( \frac{QK^T}{\sqrt{d_k}} \right) * V$$

- Every row in the  $X$  matrix corresponds to a word in the input sentence.



- We again see the difference in size of the embedding vector (512, or 4 boxes in the figure), and the q/k/v vectors (64, or 3 boxes in the figure).
- Finally, since we're dealing with matrices, we can condense steps two through six in one formula to calculate the outputs of the self-attention layer.

## 12.8. Multi-Head Attention

- If we only compute a single attention weighted sum of the values, it would be difficult to capture various different aspects of the input.
- In the example above,  $z_1$  contains a little bit of every other encoding, but it could be dominated by the actual word itself.
- If we're translating a sentence like "The animal didn't cross the street because it was too tired", it would be useful to know which word "it" refers to.
- To expand the model's to learn diverse representations focusing on different positions, the Transformer uses the Multi-Head Attention block.
- Multi-head attention computes multiple attention weighted sums instead of a single attention pass over the values.

$$X \times W^Q = Q$$

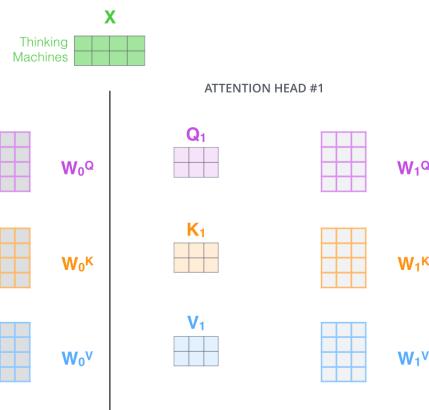
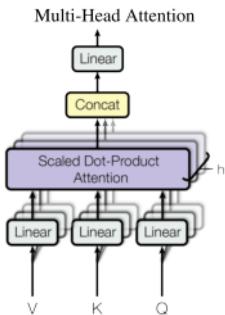
$$X \times W^K = K$$

$$X \times W^V = V$$

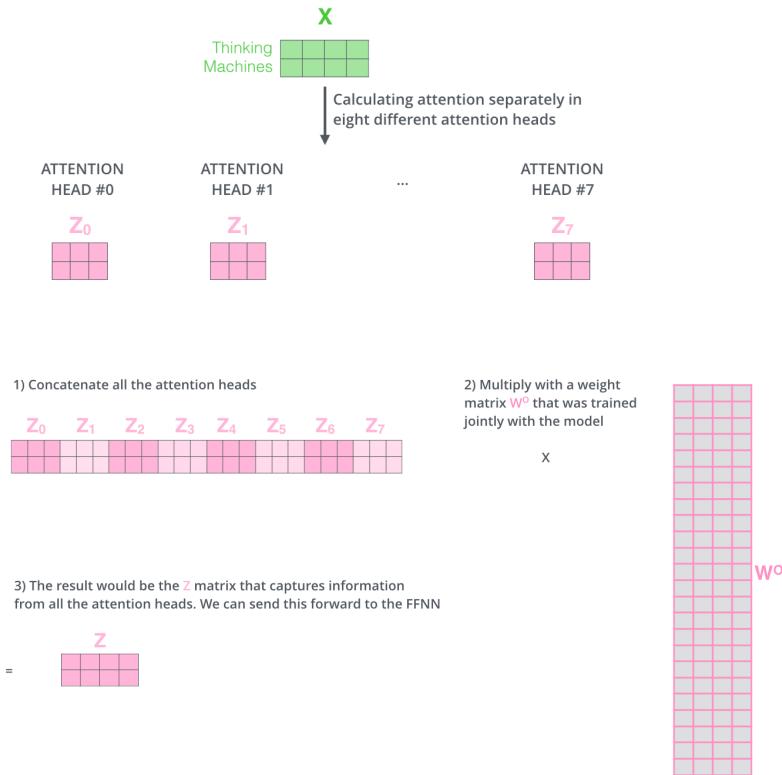
$$\text{softmax} \left( \frac{Q \times K^T}{\sqrt{d_k}} \right) V$$

$$= Z$$

- In essence, it applies different linear transformations to the values, keys, and queries for each “head” of attention.
- The Multi-Head Attention block applies multiple scaled dot product attention blocks in parallel, concatenates their outputs, then applies one single linear transformation.
- With multi-headed attention, we have not only one, but multiple sets of Query/Key/Value weight matrices.
- The Transformer uses eight attention heads, so we end up with eight sets for each encoder/decoder.
- Each of these sets is randomly initialized.
- Then, after training, each set is used to project the input embeddings (or vectors from lower encoders/decoders) into a different representation subspace.
- The multi-headed component gives the attention layer multiple “representation subspaces”.



- With multi-headed attention, we maintain separate Q/K/V weight matrices for each head resulting in different Q/K/V matrices.
- As we did before, we multiply X by the WQ/WK/WV matrices to produce Q/K/V matrices.
- If we do the same self-attention calculation we outlined above, just eight different times with different weight matrices, we end up with eight different Z matrices.
- However, the feed-forward it's expecting a single matrix (a vector for each word) not eight matrices.
- So we need a way to condense these eight down into a single matrix.
- This is done by concatenating the matrices and then multiplying them by an additional weight matrix WO.
- Let's put all these matrices in one visual so we can look at them in one place.

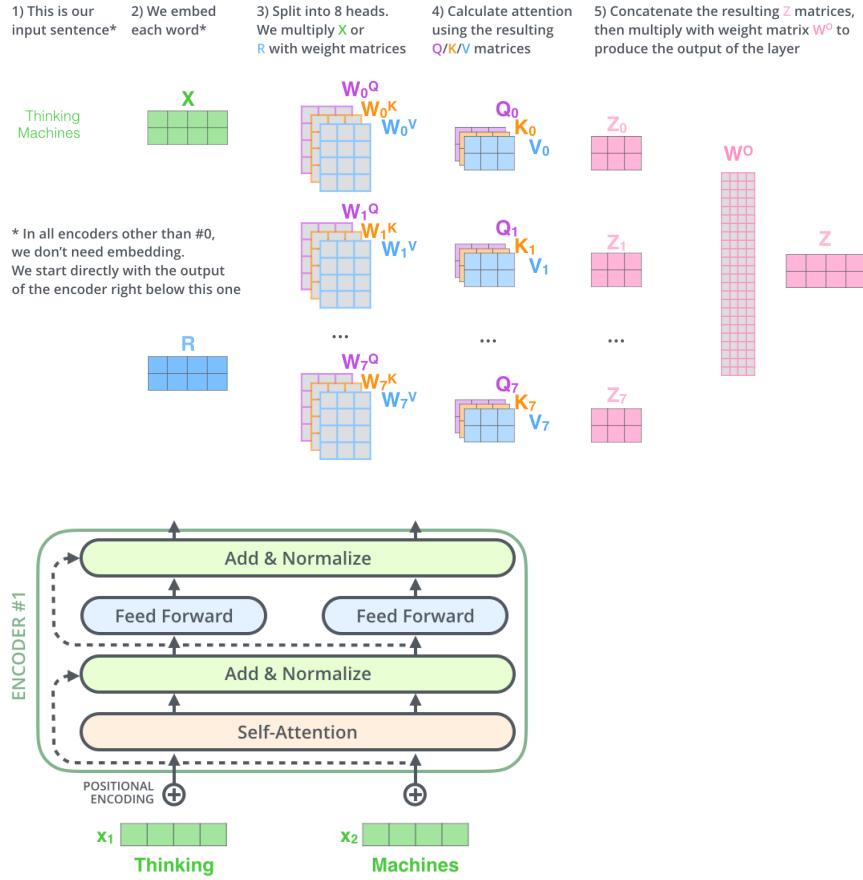


## 12.9. Residual Connections

- Between each sub-layer, there is a residual connection followed by a layer normalization.
- A residual connection is basically just taking the input and adding it to the output of the sub-network, and is a way of making training deep networks easier.
- Layer normalization is a normalization method in deep learning that is similar to batch normalization.
- If we're to visualize the vectors and the layer-norm operation associated with self attention, it would look like this:

## 12.10. The Encoder: summary

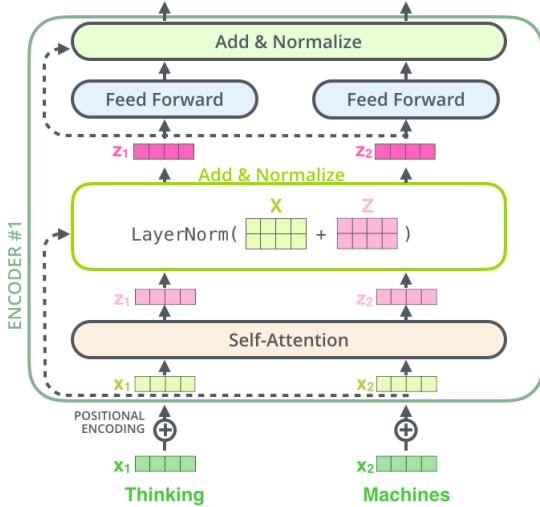
- What each encoder block is doing is actually just a bunch of matrix multiplications followed by a couple of element-wise transformations.



- This is why the Transformer is so fast: everything is just parallelizable matrix multiplications.
- The point is that by stacking these transformations on top of each other, we can create a very powerful network.
- The core of this is the attention mechanism which modifies and attends over a wide range of information.

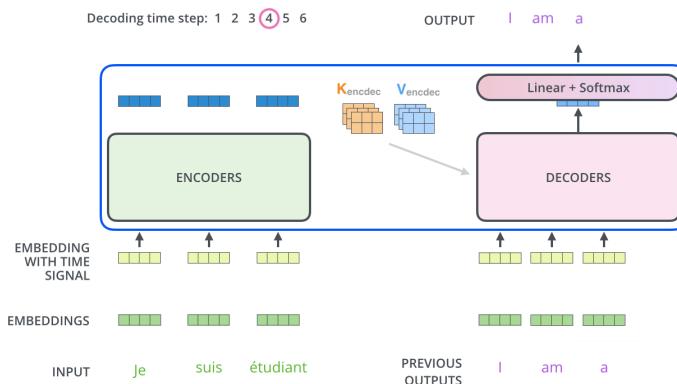
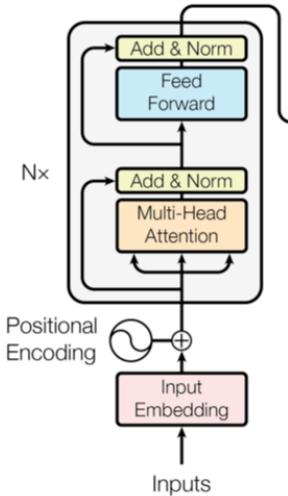
## 12.11. The Decoder

- The Transformer decoder consists of two types of attention layers: self-attention and encoder-decoder attention.
- Self-attention layers in the decoder allow each position in the decoder to pay attention to all positions within the decoder itself, similar to how the



hidden state in RNN machine translation architectures works.

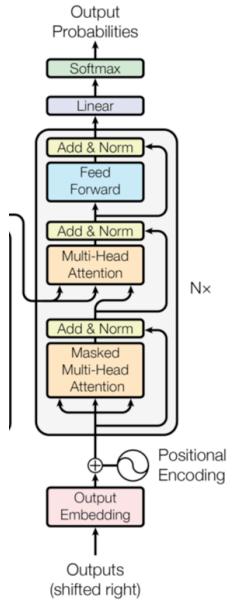
- On the other hand, the “encoder-decoder attention” layer enables the decoder to focus on relevant parts of the input sequence.
- The encoder-decoder attention layer functions similarly to multiheaded self-attention, but it generates its queries matrix from the layer below it, and uses the keys and values matrix from the output of the encoder stack.
- This allows each position in the decoder to attend to all positions in the input sequence, mimicking the typical encoder-decoder attention mechanisms seen in RNN sequence-to-sequence models.
- Each step in the decoding phase outputs an element from the output sequence (the English translation sentence in this case).
- This process is repeated until a special symbol is reached indicating the transformer decoder has completed its output.
- When we train the Transformer, we want to process all the sentences at the same time.
- However, if we give the decoder access to the entire target sentence, the model can just repeat the target sentence (in other words, it doesn’t need to learn anything).
- The self-attention layer should only be allowed to attend to earlier positions in the output sequence.
- This is done by masking the “future” tokens when decoding a certain word.



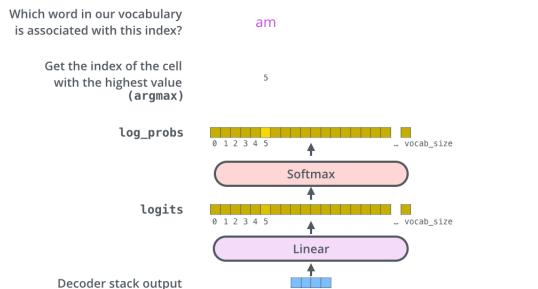
- The masking is done by setting to  $-\infty$  all values in the input of the softmax which correspond to illegal connections.
- This is why “self attention blocks” in the decoder are referred to as “masked”: the inputs to the decoder from future time-steps are masked.

## 12.12. The Final Linear and Training

- The decoder stack generates a vector of floats as its output.
- To convert this vector into a word, the final Linear layer is used, followed by a Softmax layer.



- The Linear layer is a fully connected neural network that projects the decoder's output vector into a larger vector called a logits vector.
- The logits vector has a width equal to the size of the model's output vocabulary, which contains 10,000 unique English words.
- Each cell in the logits vector represents the score of a specific word.
- The softmax layer then transforms these scores into probabilities, ensuring they are all positive and sum up to 1.0.

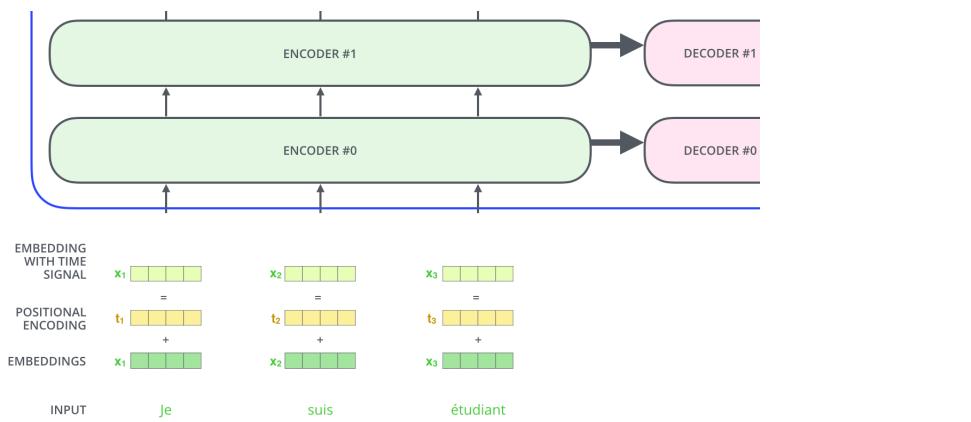


- The word with the highest probability is chosen as the output for the current time step.
- During the training of the Transformer, a cross-entropy loss is employed.

- This loss measures the difference between the predicted distribution of words and the target word, which is represented as a one-hot vector.

## 12.13. Positional Encodings

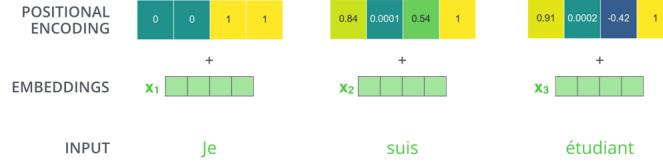
- Unlike recurrent networks, the multi-head attention network cannot naturally make use of the position of the words in the input sequence.
- Without positional encodings, the output of the multi-head attention network would be the same for the sentences “I like cats more than dogs” and “I like dogs more than cats”.
- Positional encodings explicitly encode the relative/absolute positions of the inputs as vectors and are then added to the input embeddings.



- To give the model a sense of the order of the words, we add positional encoding vectors – the values of which follow a specific pattern.
- The paper uses the following equation to compute the positional encodings:  

$$PE(pos, 2i) = \sin(pos/10000^{2i/d_{model}})$$

$$PE(pos, 2i+1) = \cos(pos/10000^{2i/d_{model}})$$
- Where  $pos$  represents the position, and  $i$  is the dimension.
- Basically, each dimension of the positional encoding is a wave with a different frequency.
- A real example of positional encoding with a toy embedding size of 4.



## 12.14. Conclusions

- The Transformer achieves better BLEU scores than previous state-of-the-art models for English-to-German translation and English-to-French translation at a fraction of the training cost.

Table 2: The Transformer achieves better BLEU scores than previous state-of-the-art models on the English-to-German and English-to-French newstest2014 tests at a fraction of the training cost.

| Model                           | BLEU        |              | Training Cost (FLOPs)                 |                     |
|---------------------------------|-------------|--------------|---------------------------------------|---------------------|
|                                 | EN-DE       | EN-FR        | EN-DE                                 | EN-FR               |
| ByteNet [17]                    | 23.75       |              |                                       |                     |
| Deep-Att + PosUnk [37]          |             | 39.2         |                                       | $1.0 \cdot 10^{20}$ |
| GNMT + RL [36]                  | 24.6        | 39.92        | $2.3 \cdot 10^{19}$                   | $1.4 \cdot 10^{20}$ |
| ConvS2S [9]                     | 25.16       | 40.46        | $9.6 \cdot 10^{18}$                   | $1.5 \cdot 10^{20}$ |
| MoE [31]                        | 26.03       | 40.56        | $2.0 \cdot 10^{19}$                   | $1.2 \cdot 10^{20}$ |
| Deep-Att + PosUnk Ensemble [37] |             | 40.4         |                                       | $8.0 \cdot 10^{20}$ |
| GNMT + RL Ensemble [36]         | 26.30       | 41.16        | $1.8 \cdot 10^{20}$                   | $1.1 \cdot 10^{21}$ |
| ConvS2S Ensemble [9]            | 26.36       | <b>41.29</b> | $7.7 \cdot 10^{19}$                   | $1.2 \cdot 10^{21}$ |
| Transformer (base model)        | 27.3        | 38.1         | <b><math>3.3 \cdot 10^{18}</math></b> |                     |
| Transformer (big)               | <b>28.4</b> | <b>41.0</b>  | $2.3 \cdot 10^{19}$                   |                     |

- The Transformer is a powerful and efficient alternative to recurrent neural networks to model dependencies using only attention mechanisms.
- It has established itself as the de facto architecture in NLP and serves as the foundation for modern large language models.

## Capítulo 13

# Grandes Modelos de Lenguaje

### 13.1. Representations for a word

- So far, we've basically had one representation of words, the word embeddings we've already learned: Word2vec, GloVe, fastText.<sup>1</sup>.
- These embeddings have a useful semi-supervised quality, as they can be learned from unlabeled corpora and used in our downstream task-oriented architectures (LSTM, CNN, Transformer).
- However, they exhibit two problems.
- Problem 1: They always produce the same representation for a word type regardless of the context in which a word token occurs
- We might want very fine-grained word sense disambiguation
- Problem 2: We just have one representation for a word, but words have different aspects, including semantics, syntactic behavior, and register/-connotations

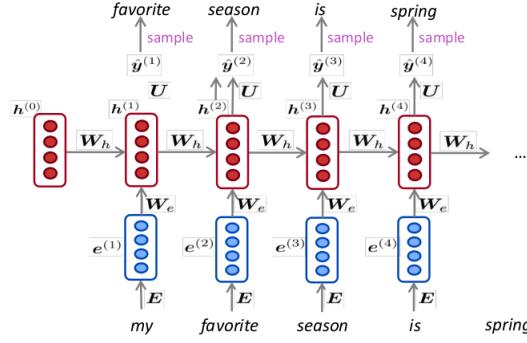
### 13.2. Neural Language Models can produce Contextualized Embeddings

- In a Neural Language Model (NLM), we immediately stuck word vectors (perhaps only trained on the corpus) through LSTM layers
- Those LSTM layers are trained to predict the next word.

---

<sup>1</sup>These slides are partially based on the Stanford CS224N: Natural Language Processing with Deep Learning course: <http://web.stanford.edu/class/cs224n/>

- But these language models produce context-specific word representations in the hidden states of each position.



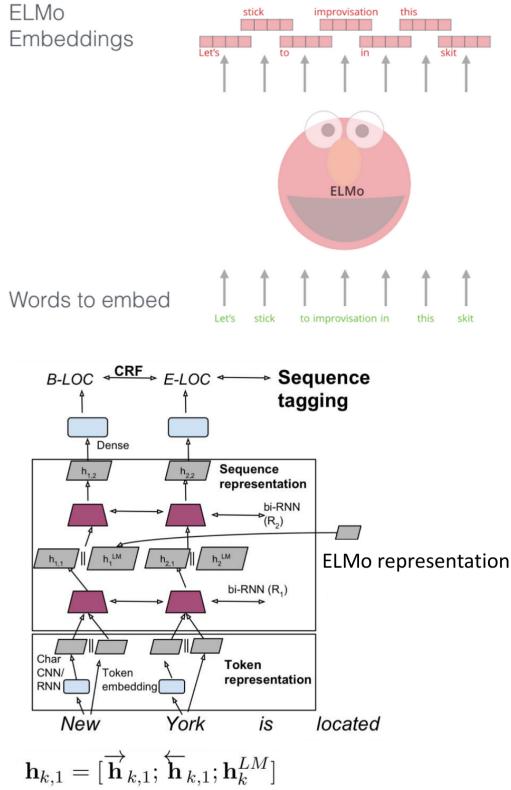
### 13.3. ELMo: Embeddings from Language Models

- Idea: train a large language model (LM) with a recurrent neural network and use its hidden states as “contextualized word embeddings” [Peters et al., 2018].
- ELMo is bidirectional LM with 2 biLSTM layers and around 100 million parameters.
- Uses character CNN to build initial word representation (only)
- 2048 char n-gram filters and 2 highway layers, 512 dim projection
- User 4096 dim hidden/cell LSTM states with 512 dim projections to next input
- Uses a residual connection
- Parameters of token input and output (softmax) are tied.

#### 13.3.1. ELMo: Use with a task

- First run biLM to get representations for each word.
- Then let (whatever) end-task model use them.
- Freeze weights of ELMo for purposes of supervised model.
- Concatenate ELMo weights into task-specific model.

#### ELMo: Results



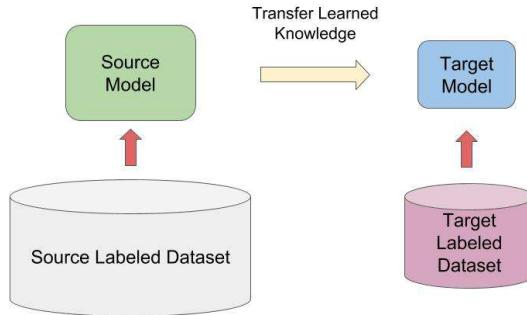
## 13.4. ULMfit

- Howard and Ruder (2018) Universal Language Model Fine-tuning for Text Classification [Howard and Ruder, 2018].
- Same general idea of transferring NLM knowledge
- Here applied to text classification
- Train LM on big general domain corpus (use biLM)
- Tune LM on target task data
- Fine-tune as classifier on target task

### 13.4.1. ULMfit emphases

- Use reasonable-size “1 GPU” language model not really huge one
- A lot of care in LM fine-tuning
- Different per-layer learning rates

| Name           | Description                                 | Year | F1    |
|----------------|---------------------------------------------|------|-------|
| ELMo           | ELMo in BiLSTM                              | 2018 | 92.22 |
| TagLM Peters   | LSTM BiLM in BiLSTM tagger                  | 2017 | 91.93 |
| Ma + Hovy      | BiLSTM + char CNN + CRF layer               | 2016 | 91.21 |
| Tagger Peters  | BiLSTM + char CNN + CRF layer               | 2017 | 90.87 |
| Ratinov + Roth | Categorical CRF+Wikipedia+word cls          | 2009 | 90.80 |
| Finkel et al.  | Categorical feature CRF                     | 2005 | 86.86 |
| IBM Florian    | Linear/softmax/TBL/HMM ensemble, gazettes++ | 2003 | 88.76 |
| Stanford       | MEMM softmax markov model                   | 2003 | 86.07 |



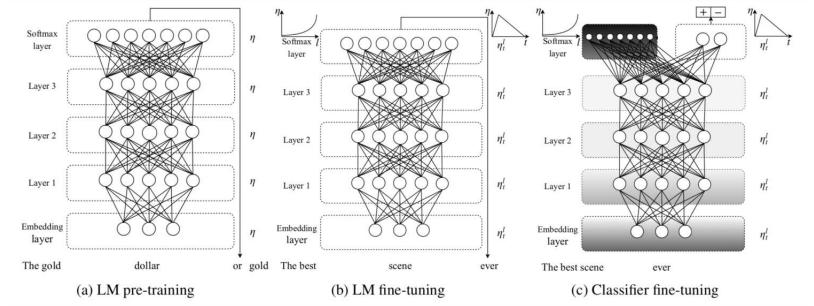
- Slanted triangular learning rate (STLR) schedule
- Gradual layer unfreezing and STLR when learning classifier
- Classify using concatenation  $[h_T, \text{maxpool}(h), \text{meanpool}(h)]$

### 13.4.2. ULMfit transfer learning

## 13.5. Let's scale it up!

## 13.6. BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers)

- Idea: combine ideas from ELMO, ULMFit and the Transformer [Kenton and Toutanova, 2019].
- How: Train a large model (335 million parameters) from a large unlabeled corpus using a Transformer encoder and then fine-tune it for other downstream tasks.

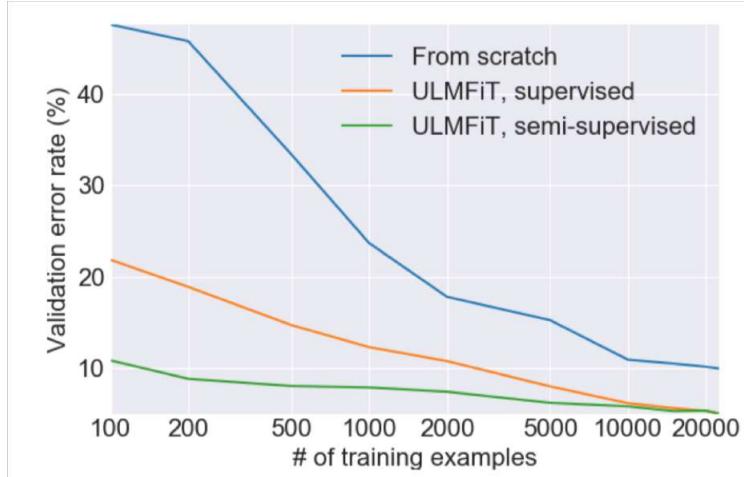


| Model                             | Test       | Model                        | Test       |
|-----------------------------------|------------|------------------------------|------------|
| CoVe (McCann et al., 2017)        | 8.2        | CoVe (McCann et al., 2017)   | 4.2        |
| oh-LSTM (Johnson and Zhang, 2016) | 5.9        | TBCNN (Mou et al., 2015)     | 4.0        |
| Virtual (Miyato et al., 2016)     | 5.9        | LSTM-CNN (Zhou et al., 2016) | 3.9        |
| ULMFiT (ours)                     | <b>4.6</b> | ULMFiT (ours)                | <b>3.6</b> |

Text clas-

sifier error rates

- The parallelizable properties of the Transformer (unlike RNNs, which must be processed sequentially) allow the model to scale to more parameters.
- This model is related but a little bit different from a standard Language Model.
- BERT doesn't predict the next word in a sentence like a traditional language model, but rather learns utilizes a "**masked language modeling**" (MLM) objective during pre-training.
- In MLM, random words in a sentence are masked and the model is trained to predict those masked words based on the surrounding context.
- BERT also incorporates a "**next sentence prediction**" task, where pairs of sentences are fed to the model, and it learns to predict whether the second sentence follows the first in the original text.
- Fine-tuning** BERT involves adding a task-specific layer on top of the pre-trained model and training it on a labeled dataset for the target task.
- BERT achieved state-of-the-art results at the time of its release on NLP tasks, including sentence classification, named entity recognition, question answering, and more.



### 13.7. Masked Language Modeling and Next Sentence Prediction

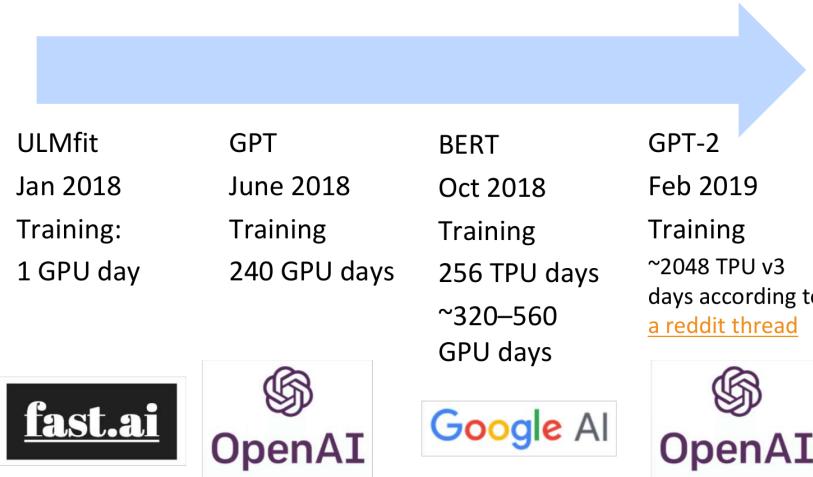
- MLM: Mask out k % of the input words, and then predict the masked words
- They always use k = 15 %.
- Too little masking: Too expensive to train
- Too much masking: Not enough context
- Next sentence prediction: To learn relationships between sentences, predict whether Sentence B is actual sentence that proceeds Sentence A, or a random sentence

### 13.8. BERT sentence pair encoding

- Token embeddings: Words are divided into smaller units called word pieces, and each word piece is assigned a token embedding.
- BERT learns a segmented embedding [SEP] to differentiate between the two sentences in a pair.
- BERT utilizes positional embeddings to capture the position of each word within the sentence.

### 13.9. BERT Model Architecture and Training

- BERT is based on the Transformer encoder.



- The multi-headed self-attention block of the Transformer allows BERT to consider long-distance context effectively.
- The use of self-attention also enables efficient computations on GPU/TPU, with only a single multiplication per layer.
- BERT was trained on a large amount of unlabeled text data from Wikipedia and BookCorpus.
- Two different model sizes were trained:
  1. BERT-Base: 12 layers, 768 hidden units, and 12 attention heads.
  2. BERT-Large: 24 layers, 1024 hidden units, and 16 attention heads.
- The training process involved utilizing 4x4 or 8x8 TPU (Tensor Processing Unit) configurations for faster computation.
- Training BERT models took approximately 4 days to complete.

### 13.10. BERT model fine tuning

- Fine-tuning involves customizing the pre-trained BERT model for specific tasks.
- To fine-tune BERT, we add a task-specific layer on top of the pre-trained BERT model.
- The task-specific layer can vary depending on the task at hand, such as sequence labeling or sentence classification.
- We train the entire model, including the pre-trained BERT and the added task-specific layer, for the specific task.

|                                                                                                              |                                                                                   |                                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| All of these models are Transformer architecture models ... so maybe we had better learn about Transformers? |                                                                                   |                                                                                     |
| ULMfit                                                                                                       | GPT                                                                               | GPT-2                                                                               |
| Jan 2018                                                                                                     | June 2018                                                                         | Oct 2018                                                                            |
| Training:                                                                                                    | Training                                                                          | Training                                                                            |
| 1 GPU day                                                                                                    | 240 GPU days                                                                      | 256 TPU days<br>~320–560 GPU days                                                   |
|                                                                                                              |                                                                                   | ~2048 TPU v3 days according to <a href="#">a reddit thread</a>                      |
|                             |  |   |
|                                                                                                              |                                                                                   |  |



### 13.10.1. BERT results on GLUE tasks

- BERT was massively popular and hugely versatile; finetuning BERT led to new state-of-the-art results on a broad range of tasks.
- BERT's performance was assessed using the GLUE benchmark, a collection of diverse NLP tasks.
- The GLUE benchmark primarily consists of natural language inference tasks, but also includes sentence similarity and sentiment analysis tasks.

#### Example Task: MultiNLI (Natural Language Inference)

- Premise: "Hills and mountains are especially sanctified in Jainism."
- Hypothesis: "Jainism hates nature."
- Label: Contradiction

#### Example Task: CoLa

- Sentence: "The wagon rumbled down the road."

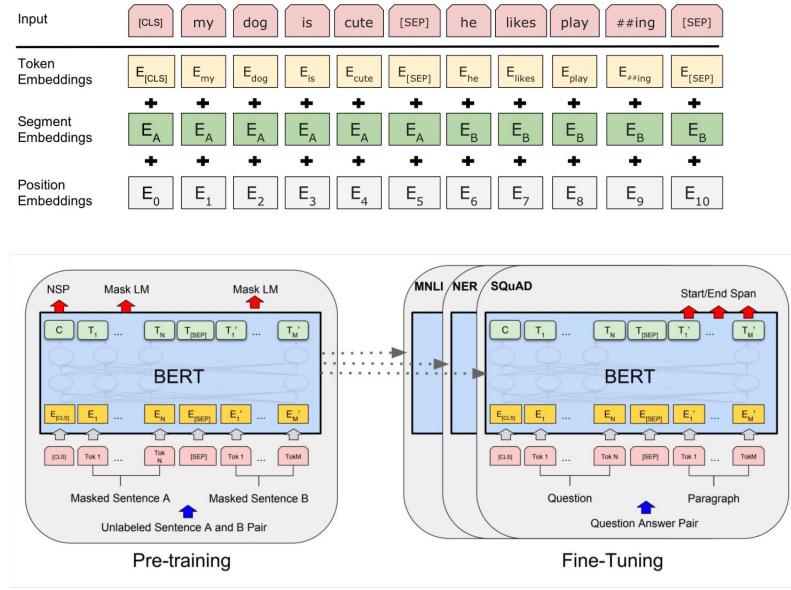


- Label: Acceptable
- Sentence: "The car honked down the road."
- Label: Unacceptable
  
- QQP: Quora Question Pairs (detect paraphrase questions)
- QNLI: natural language inference over question answering data
- SST-2: sentiment analysis
- CoLA: corpus of linguistic acceptability (detect whether sentences are grammatical.)
- STS-B: semantic textual similarity
- MRPC: microsoft paraphrase corpus
- RTE: a small natural language inference corpus

### 13.10.2. BERT Effect of pre-training task

## 13.11. Pre-training decoders GPT and GPT-2

- Contemporary to BERT, OpenAI introduced an alternative approach called Generative Pretrained Transformer (GPT) [Radford et al., 2018].
- The idea behind GPT is to train a large standard language model using the generative part of the Transformer, specifically the decoder.
- GPT is a Transformer decoder with 12 layers and 117 million parameters.
- It has 768-dimensional hidden states and 3072-dimensional feed-forward hidden layers.
- GPT utilizes byte-pair encoding with 40,000 merges to handle subword units.



- GPT was trained on BooksCorpus, which consists of over 7,000 unique books.
- OpenAI later introduced GPT-2, a larger version with 1.5 billion parameters, trained on even more data.
- GPT-2 has been shown to generate relatively convincing samples of natural language.

#### GPT-2 language model (cherry-picked) output Human provided prompt:

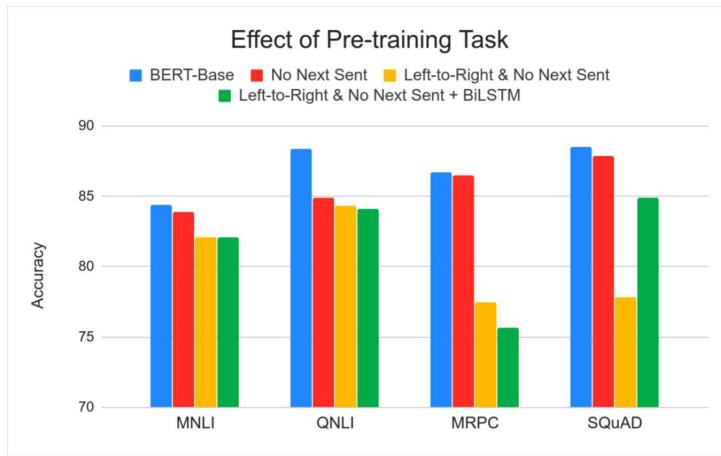
In a shocking finding, scientist discovered a herd of unicorns living in a remote, previously unexplored valley, in the Andes Mountains. Even more surprising to the researchers was the fact that the unicorns spoke perfect English.  
**Model Completion:**

The scientist named the population, after their distinctive horn, Ovid's Unicorn. These four-horned, silver-white unicorns were previously unknown to science.

Now, after almost two centuries, the mystery of what sparked this odd phenomenon is finally solved.

Dr. Jorge Pérez, an evolutionary biologist from the University of La Paz, and several companions, were exploring the Andes Mountains when they found a small valley, with no other animals or humans. Pérez noticed that the valley had what appeared to be a natural fountain, surrounded by two peaks of rock and silver snow.

| System                | MNLI-(m/mm)<br>392k | QQP<br>363k | QNLI<br>108k | SST-2<br>67k | CoLA<br>8.5k | STS-B<br>5.7k | MRPC<br>3.5k | RTE<br>2.5k | Average     |
|-----------------------|---------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|-------------|-------------|
| Pre-OpenAI SOTA       | 80.6/80.1           | 66.1        | 82.3         | 93.2         | 35.0         | 81.0          | 86.0         | 61.7        | 74.0        |
| BiLSTM+ELMo+Attn      | 76.4/76.1           | 64.8        | 79.9         | 90.4         | 36.0         | 73.3          | 84.9         | 56.8        | 71.0        |
| OpenAI GPT            | 82.1/81.4           | 70.3        | 88.1         | 91.3         | 45.4         | 80.0          | 82.3         | 56.0        | 75.2        |
| BERT <sub>BASE</sub>  | 84.6/83.4           | 71.2        | 90.1         | 93.5         | 52.1         | 85.8          | 88.9         | 66.4        | 79.6        |
| BERT <sub>LARGE</sub> | <b>86.7/85.9</b>    | <b>72.1</b> | <b>91.1</b>  | <b>94.9</b>  | <b>60.5</b>  | <b>86.5</b>   | <b>89.3</b>  | <b>70.1</b> | <b>81.9</b> |



### 13.12. What kinds of things does pretraining learn?

- Stanford University is located in \_\_\_\_\_, California. [Trivia]
- I put \_\_\_\_\_ fork down on the table. [syntax]
- The woman walked across the street, checking for traffic over \_\_\_\_\_ shoulder. [coreference]
- I went to the ocean to see the fish, turtles, seals, and \_\_\_\_\_. [lexical semantics/topic]
- Overall, the value I got from the two hours watching it was the sum total of the popcorn and the drink. The movie was \_\_\_\_\_. [sentiment]
- Iroh went into the kitchen to make some tea. Standing next to Iroh, Zuko pondered his destiny. Zuko left the \_\_\_\_\_. [some reasoning – this is harder]
- I was thinking about the sequence that goes 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, \_\_\_\_\_. [some basic arithmetic; they don't learn the Fibonacci sequence]

### 13.13. Phase Change: GPT-3 (2020)

- GPT-3 is another Transformer-based Language Model (LM) that pushed the boundaries with nearly 200 billion parameters, making it the largest model at the time [Brown et al., 2020].
- It was trained on a massive corpus consisting of nearly 500 billion words.
- **In-context learning:** GPT-3 demonstrated the ability to solve various natural language processing (NLP) tasks using **zero-shot**, **one-shot** and **few-shot learning**.
- The key to this capability lies in the prompt or context provided to GPT-3.
- GPT-3 demonstrated the ability to solve various tasks without performing gradient updates to the base model.



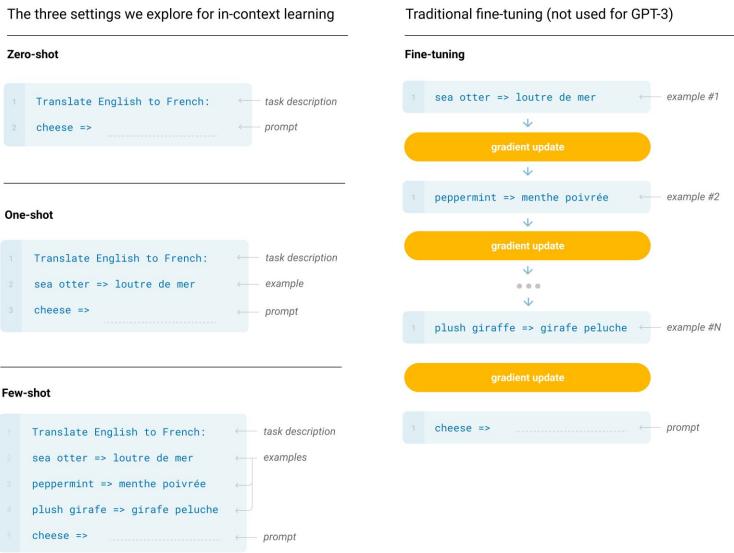
### 13.14. Zero-shot, One-shot, and Few-shot Learning with GPT-3

- **Zero-shot learning:** With zero-shot learning, GPT-3 can tackle tasks without any specific training. It achieves this by providing a prompt or instruction to guide its generation process. For example, by providing GPT-3 with a prompt like, “Translate this English sentence to French,” it can generate the translated sentence without any explicit training for translation tasks.
- **One-shot learning:** In one-shot learning, GPT-3 can perform a task by adding a single input-output pair to the instruction.
- **Few-shot learning:** similar idea but providing a limited number input-output pairs after the instruction in the prompt.

GPT-3 Few-shot Learning Results

### 13.15. Chain-of-thought Prompting

- Chain-of-thought prompting is a simple mechanism for eliciting multi-step reasoning behavior in large language models.



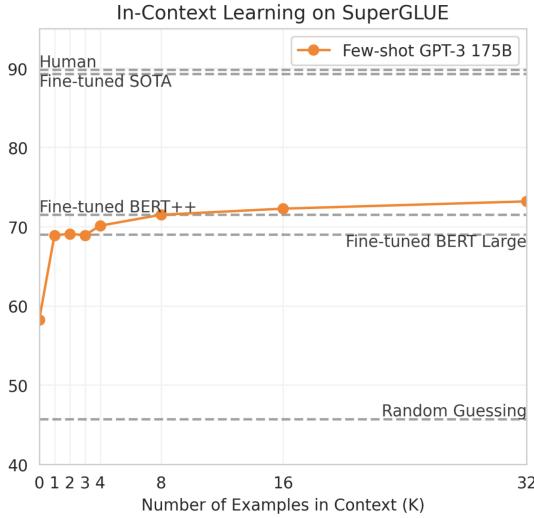
- Idea: augment each exemplar in few-shot prompting with a chain of thought for an associated answer [Wei et al., 2022]

## 13.16. Language Models as User Assistants (or Chatbots)

- Autoregressive Large Language Models are not aligned with user intent [Ouyang et al., 2022]
- Solution: align the language model with user intent via fine-tuning.

### 13.16.1. LaMDA: Language Models for Dialog Applications

- LaMDA is a language model developed by Google based on Transformer optimized for open domain dialog [Thoppilan et al., 2022].
- It has 137 billion parameters and is trained on 1.56 billion words.
- It is initially pre-trained in the same way as traditional language models (predicting words) with language models (predicting words) with a strong focus on dialog data.
- It is then fine-tuned to generate responses with respect to several other criteria.



### Chain-of-thought prompting

#### Standard Prompting

**Model Input**

Q: Roger has 5 tennis balls. He buys 2 more cans of tennis balls. Each can has 3 tennis balls. How many tennis balls does he have now?

A: The answer is 11.

Q: The cafeteria had 23 apples. If they used 20 to make lunch and bought 6 more, how many apples do they have?

**Model Output**

A: The answer is 27. ❌

#### Chain-of-Thought Prompting

**Model Input**

Q: Roger has 5 tennis balls. He buys 2 more cans of tennis balls. Each can has 3 tennis balls. How many tennis balls does he have now?

A: Roger started with 5 balls. 2 cans of 3 tennis balls each is 6 tennis balls.  $5 + 6 = 11$ . The answer is 11.

Q: The cafeteria had 23 apples. If they used 20 to make lunch and bought 6 more, how many apples do they have?

**Model Output**

A: The cafeteria had 23 apples originally. They used 20 to make lunch. So they had  $23 - 20 = 3$ . They bought 6 more apples, so they have  $3 + 6 = 9$ . The answer is 9. ✓

- In order to fit LaMDA to all these criteria they worked with a large number of crowd-workers.
- These are people who manually labeled conversations from the pre-trained model.

### LaMDA Optimization Criteria   Quality

- Sensibleness: give meaningful answers.
- Specificity: avoid vague answers.
- Interestingness: give insightful, unexpected or witty answers.

### Safety

- Avoid violent language.

PROMPT Explain the moon landing to a 6 year old in a few sentences.

COMPLETION GPT-3

Explain the theory of gravity to a 6 year old.  
 Explain the theory of relativity to a 6 year old in a few sentences.  
 Explain the big bang theory to a 6 year old.  
 Explain evolution to a 6 year old.



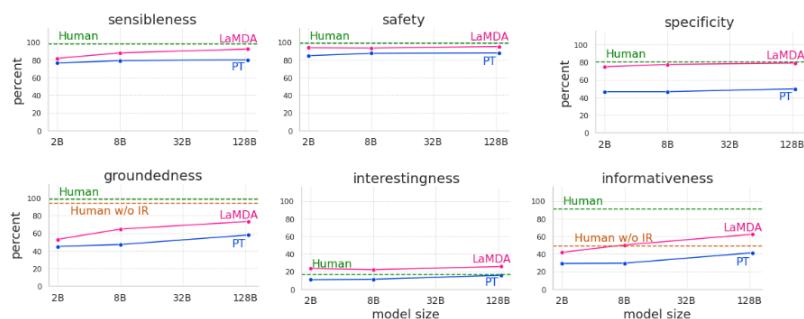
- Avoid hate speech.
- Avoid stereotyped speech.

### Groundedness and Informativity

- Avoid giving answers not validated by external sources.
- Optimize the fraction of responses that can be validated in authoritative sources using search engines.

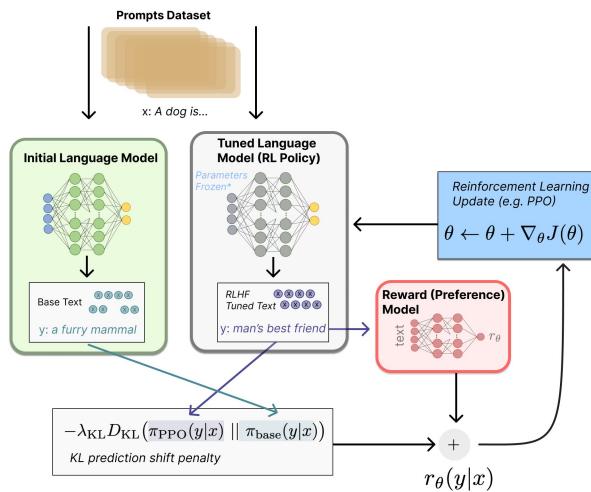
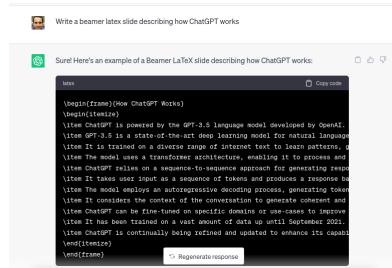
### LaMDA Evaluation

- The system is compared with the original pre-trained PT model and human judgments.
- The evaluation is done by another group of people through questionnaires.



### 13.17. ChatGPT and RLHF

- Model similar to LaMDA launched by OpenAI at the end of 2022.
- It also uses Crowdsourcing to improve its responses, but its fine-tuning process uses Reinforcement Learning (RL), a different learning paradigm from supervised learning.
- In particular, it uses Reinforcement Learning from Human Feedback (RLHF) [Ouyang et al., 2022].
- It builds a preference model that assigns a score to a generated sentence and adjusts the language model accordingly.



Source: <https://huggingface.co/blog/rlhf>

### 13.18. GPT-4 (2023)

- Last LM of OpenAI [OpenAI, 2023], this time able to include images in the prompt.
- Still a Transformer LM.
- Able to pass exams in several disciplines being able to process the images of the questions.
- From ChatGPT onwards, companies have stopped making public all the details of the construction of their models.

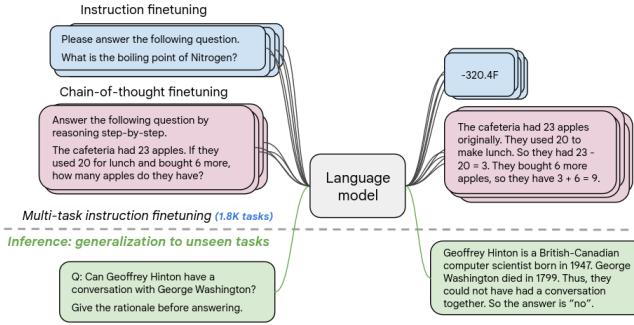
| Example of GPT-4 visual input: |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| User                           | What is funny about this image? Describe it panel by panel.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Source:                        | <a href="https://www.reddit.com/r/humor/comments/1absh5v/funny/">https://www.reddit.com/r/humor/comments/1absh5v/funny/</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| GPT-4                          | The image shows a package for a "Lightning Cable" adapter with three panels.<br>Panel 1: A smartphone with a VGA connector (a large, blue, 15-pin connector typically used for computer monitors) plugged into its charging port.<br>Panel 2: The package for the "Lightning Cable" adapter with a picture of a VGA connector on it.<br>Panel 3: A close-up of the VGA connector with a small Lightning connector (used for charging iPhones and other Apple devices) at the end.<br>The humor in this image comes from the absurdity of plugging a large, outdated VGA connector into a small, modern smartphone charging port. |

### 13.19. Instruction Fine-tuning

- A more efficient way to fine-tune Large Language Models is Instruction Fine-Tuning [Chung et al., 2022].
- Idea: collect examples of (instruction, output) pairs across many tasks and finetune an LM.
- Evaluate on unseen tasks.

### 13.20. Dangers of Large Language Models

The research community has raised concerns about several dangers associated with Large Language Models [Bender et al., 2021].



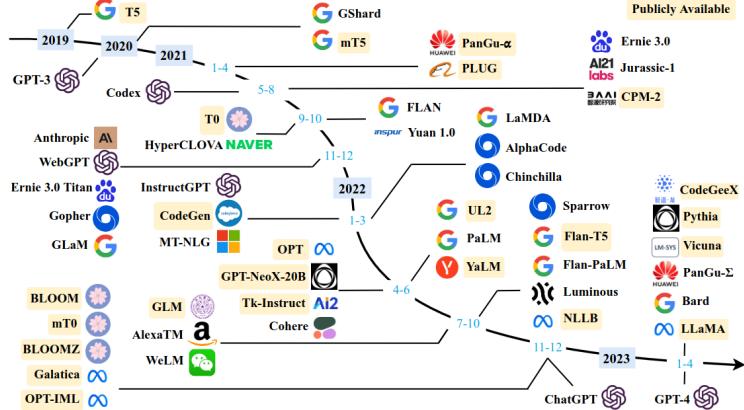
- **Hallucination:** Probabilistic language models can generate fabricated information lacking factual basis.
- **Fairness:** These models can perpetuate biases present in the training data, including toxic language, racism, and gender discrimination.
- **Copyright infringement:** Large language models may violate copyright laws by reproducing content without proper authorization.
- **Lack of transparency:** The complex nature of these models makes it difficult to interpret their predictions and understand the reasoning behind specific responses.
- **Monopolization:** The high costs of training these models create barriers for non-big-tech companies to compete.
- **High carbon footprint:** The energy-intensive training process of these models contributes to a significant carbon footprint.

### 13.21. Large Language Models Time-line

- As of today (2023), the development of new Large Language Models continues uninterrupted.
- A timeline of existing large language models (having a size larger than 10B) in recent years [Zhao et al., 2023].

### 13.22. Prompt Engineering

- Prompt engineering is a new discipline for developing and optimizing prompts to efficiently use language models (LMs).



## 13.23. Conclusions

- The growth in the size and power of language models has accelerated dramatically.
- It is very difficult to predict what they will do in the future.
- What can we predict with confidence?
- There will be an overload of generative models for multiple formats (text, code, image, video, virtual realities).
- There will be a plethora of agents/programs that act and make decisions by interacting with these models (medical appointments, investments, travel).



# Bibliografía

- [Amir et al., 2015] Amir, S., Ling, W., Astudillo, R., Martins, B., Silva, M. J., and Trancoso, I. (2015). Inesc-id: A regression model for large scale twitter sentiment lexicon induction. In *Proceedings of the 9th International Workshop on Semantic Evaluation (SemEval 2015)*, pages 613–618, Denver, Colorado. Association for Computational Linguistics.
- [Baroni et al., 2014] Baroni, M., Dinu, G., and Kruszewski, G. (2014). Don’t count, predict! a systematic comparison of context-counting vs. context-predicting semantic vectors. In *Proceedings of the 52nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, pages 238–247. Association for Computational Linguistics.
- [Bender, 2013] Bender, E. M. (2013). Linguistic fundamentals for natural language processing: 100 essentials from morphology and syntax. *Synthesis lectures on human language technologies*, 6(3):1–184.
- [Bender et al., 2021] Bender, E. M., Gebru, T., McMillan-Major, A., and Shmitchell, S. (2021). On the dangers of stochastic parrots: Can language models be too big? In *Proceedings of the 2021 ACM conference on fairness, accountability, and transparency*, pages 610–623.
- [Bengio, 2012] Bengio, Y. (2012). Practical recommendations for gradient-based training of deep architectures. In *Neural networks: Tricks of the trade*, pages 437–478. Springer.
- [Bengio et al., 2000] Bengio, Y., Ducharme, R., and Vincent, P. (2000). A neural probabilistic language model. *Advances in neural information processing systems*, 13.
- [Bikel et al., 1999] Bikel, D. M., Schwartz, R. M., and Weischedel, R. M. (1999). An algorithm that learns what’s in a name. *Mach. Learn.*, 34(1-3):211–231.
- [Bishop, 2006] Bishop, C. M. (2006). *Pattern recognition and machine learning*. Springer.
- [Blei et al., 2003] Blei, D. M., Ng, A. Y., and Jordan, M. I. (2003). Latent dirichlet allocation. *Journal of machine Learning research*, 3(Jan):993–1022.

- [Bojanowski et al., 2016] Bojanowski, P., Grave, E., Joulin, A., and Mikolov, T. (2016). Enriching word vectors with subword information. *arXiv preprint arXiv:1607.04606*.
- [Brown et al., 1992] Brown, P. F., Desouza, P. V., Mercer, R. L., Pietra, V. J. D., and Lai, J. C. (1992). Class-based n-gram models of natural language. *Computational linguistics*, 18(4):467–479.
- [Brown et al., 2020] Brown, T., Mann, B., Ryder, N., Subbiah, M., Kaplan, J. D., Dhariwal, P., Neelakantan, A., Shyam, P., Sastry, G., Askell, A., et al. (2020). Language models are few-shot learners. *Advances in neural information processing systems*, 33:1877–1901.
- [Cho, 2015] Cho, K. (2015). Natural language understanding with distributed representation. *arXiv preprint arXiv:1511.07916*.
- [Cho et al., 2015] Cho, K., Courville, A., and Bengio, Y. (2015). Describing multimedia content using attention-based encoder-decoder networks. *IEEE Transactions on Multimedia*, 17(11):1875–1886.
- [Cho et al., 2014] Cho, K., Van Merriënboer, B., Gulcehre, C., Bahdanau, D., Bougares, F., Schwenk, H., and Bengio, Y. (2014). Learning phrase representations using rnn encoder-decoder for statistical machine translation. *arXiv preprint arXiv:1406.1078*.
- [Chung et al., 2022] Chung, H. W., Hou, L., Longpre, S., Zoph, B., Tay, Y., Fedus, W., Li, Y., Wang, X., Dehghani, M., Brahma, S., Webson, A., Gu, S. S., Dai, Z., Suzgun, M., Chen, X., Chowdhery, A., Castro-Ros, A., Pellat, M., Robinson, K., Valter, D., Narang, S., Mishra, G., Yu, A., Zhao, V., Huang, Y., Dai, A., Yu, H., Petrov, S., Chi, E. H., Dean, J., Devlin, J., Roberts, A., Zhou, D., Le, Q. V., and Wei, J. (2022). Scaling instruction-finetuned language models.
- [Chung et al., 2014] Chung, J., Gulcehre, C., Cho, K., and Bengio, Y. (2014). Empirical evaluation of gated recurrent neural networks on sequence modeling. *arXiv preprint arXiv:1412.3555*.
- [Collins, 2013] Collins, M. (2013). Statistical nlp lecture notes. *Lecture Notes*.
- [Collobert et al., 2011] Collobert, R., Weston, J., Bottou, L., Karlen, M., Kavukcuoglu, K., and Kuksa, P. (2011). Natural language processing (almost) from scratch. *Journal of machine learning research*, 12(Aug):2493–2537.
- [Conneau et al., 2017] Conneau, A., Schwenk, H., Barrault, L., and Lecun, Y. (2017). Very deep convolutional networks for text classification. In *Proceedings of the 15th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics: Volume 1, Long Papers*, volume 1, pages 1107–1116.
- [Cybenko, 1989] Cybenko, G. (1989). Approximation by superpositions of a sigmoidal function. *Mathematics of control, signals and systems*, 2(4):303–314.

- [Deng and Liu, 2018] Deng, L. and Liu, Y. (2018). *Deep Learning in Natural Language Processing*. Springer.
- [Duchi et al., 2011] Duchi, J., Hazan, E., and Singer, Y. (2011). Adaptive sub-gradient methods for online learning and stochastic optimization. *Journal of Machine Learning Research*, 12(Jul):2121–2159.
- [Eisenstein, 2018] Eisenstein, J. (2018). Natural language processing. Technical report, Georgia Tech.
- [Felbo et al., 2017] Felbo, B., Mislove, A., Søgaard, A., Rahwan, I., and Lehmann, S. (2017). Using millions of emoji occurrences to learn any-domain representations for detecting sentiment, emotion and sarcasm. In *Proceedings of the 2017 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, EMNLP 2017, Copenhagen, Denmark, September 9-11, 2017*, pages 1615–1625.
- [Fromkin et al., 2018] Fromkin, V., Rodman, R., and Hyams, N. (2018). *An introduction to language*. Cengage Learning.
- [Glorot et al., 2011] Glorot, X., Bordes, A., and Bengio, Y. (2011). Deep sparse rectifier neural networks. In *Proceedings of the fourteenth international conference on artificial intelligence and statistics*, pages 315–323.
- [Goldberg, 2016] Goldberg, Y. (2016). A primer on neural network models for natural language processing. *J. Artif. Intell. Res.(JAIR)*, 57:345–420.
- [Goldberg, 2017] Goldberg, Y. (2017). Neural network methods for natural language processing. *Synthesis Lectures on Human Language Technologies*, 10(1):1–309.
- [Goldberg and Levy, 2014] Goldberg, Y. and Levy, O. (2014). word2vec explained: deriving mikolov et al.’s negative-sampling word-embedding method. *arXiv preprint arXiv:1402.3722*.
- [Goodfellow et al., 2016] Goodfellow, I., Bengio, Y., and Courville, A. (2016). *Deep learning*. MIT press.
- [Harris, 1954] Harris, Z. (1954). Distributional structure. *Word*, 10(23):146–162.
- [Hochreiter and Schmidhuber, 1997] Hochreiter, S. and Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural computation*, 9(8):1735–1780.
- [Hornik et al., 1989] Hornik, K., Stinchcombe, M., and White, H. (1989). Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural networks*, 2(5):359–366.
- [Howard and Ruder, 2018] Howard, J. and Ruder, S. (2018). Universal language model fine-tuning for text classification. In *Proceedings of the 56th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 1: Long Papers)*, pages 328–339, Melbourne, Australia. Association for Computational Linguistics.

- [Huang et al., 2015] Huang, Z., Xu, W., and Yu, K. (2015). Bidirectional lstm-crf models for sequence tagging. *arXiv preprint arXiv:1508.01991*.
- [Johnson, 2014] Johnson, M. (2014). Introduction to computational linguistics and natural language processing (slides). 2014 Machine Learning Summer School.
- [Jozefowicz et al., 2015] Jozefowicz, R., Zaremba, W., and Sutskever, I. (2015). An empirical exploration of recurrent network architectures. In *International conference on machine learning*, pages 2342–2350.
- [Jurafsky and Martin, 2023] Jurafsky, D. and Martin, J. H. (2023). *Speech and Language Processing: An Introduction to Natural Language Processing, Computational Linguistics, and Speech Recognition*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 3rd (draft) edition.
- [Kenton and Toutanova, 2019] Kenton, J. D. M.-W. C. and Toutanova, L. K. (2019). Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. In *Proceedings of NAACL-HLT*, pages 4171–4186.
- [Kingma and Ba, 2014] Kingma, D. P. and Ba, J. (2014). Adam: A method for stochastic optimization. *arXiv preprint arXiv:1412.6980*.
- [Kupiec, 1992] Kupiec, J. (1992). Robust part-of-speech tagging using a hidden markov model. *Computer speech & language*, 6(3):225–242.
- [Lafferty et al., 2001] Lafferty, J. D., McCallum, A., and Pereira, F. C. N. (2001). Conditional random fields: Probabilistic models for segmenting and labeling sequence data. In Brodley, C. E. and Danyluk, A. P., editors, *Proceedings of the Eighteenth International Conference on Machine Learning (ICML 2001), Williams College, Williamstown, MA, USA, June 28 - July 1, 2001*, pages 282–289. Morgan Kaufmann.
- [LeCun et al., 1998] LeCun, Y., Bottou, L., Bengio, Y., and Haffner, P. (1998). Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE*, 86(11):2278–2324.
- [Levy and Goldberg, 2014] Levy, O. and Goldberg, Y. (2014). Neural word embedding as implicit matrix factorization. In *Advances in neural information processing systems*, pages 2177–2185.
- [Li et al., 2015] Li, J., Luong, M.-T., Jurafsky, D., and Hovy, E. (2015). When are tree structures necessary for deep learning of representations? *arXiv preprint arXiv:1503.00185*.
- [Manning et al., 2008] Manning, C. D., Raghavan, P., and Schütze, H. (2008). *Introduction to Information Retrieval*. Cambridge University Press, New York, NY, USA.

- [McCallum et al., 2000] McCallum, A., Freitag, D., and Pereira, F. C. (2000). Maximum entropy markov models for information extraction and segmentation. In *Icml*, volume 17, pages 591–598.
- [McCallum et al., 1998] McCallum, A., Nigam, K., et al. (1998). A comparison of event models for naive bayes text classification. In *AAAI-98 workshop on learning for text categorization*, volume 752, pages 41–48. Madison, WI.
- [Mikolov et al., 2013] Mikolov, T., Sutskever, I., Chen, K., Corrado, G. S., and Dean, J. (2013). Distributed representations of words and phrases and their compositionality. In Burges, C., Bottou, L., Welling, M., Ghahramani, Z., and Weinberger, K., editors, *Advances in Neural Information Processing Systems 26*, pages 3111–3119. Curran Associates, Inc.
- [Mohammad et al., 2013] Mohammad, S. M., Kiritchenko, S., and Zhu, X. (2013). Nrc-canada: Building the state-of-the-art in sentiment analysis of tweets. *Proceedings of the seventh international workshop on Semantic Evaluation Exercises (SemEval-2013)*.
- [Nakov et al., 2013] Nakov, P., Rosenthal, S., Kozareva, Z., Stoyanov, V., Ritter, A., and Wilson, T. (2013). Semeval-2013 task 2: Sentiment analysis in twitter. In *Proceedings of the seventh international workshop on Semantic Evaluation Exercises*, pages 312–320, Atlanta, Georgia, USA. Association for Computational Linguistics.
- [Nesterov, 2018] Nesterov, Y. (2018). *Lectures on convex optimization*, volume 137. Springer.
- [OpenAI, 2023] OpenAI (2023). Gpt-4 technical report.
- [Ouyang et al., 2022] Ouyang, L., Wu, J., Jiang, X., Almeida, D., Wainwright, C., Mishkin, P., Zhang, C., Agarwal, S., Slama, K., Ray, A., et al. (2022). Training language models to follow instructions with human feedback. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 35:27730–27744.
- [Pennington et al., 2014] Pennington, J., Socher, R., and Manning, C. D. (2014). Glove: Global vectors for word representation. In *Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, EMNLP 2014, October 25-29, 2014, Doha, Qatar, A meeting of SIGDAT, a Special Interest Group of the ACL*, pages 1532–1543.
- [Peters et al., 2018] Peters, M. E., Neumann, M., Iyyer, M., Gardner, M., Clark, C., Lee, K., and Zettlemoyer, L. (2018). Deep contextualized word representations. In *Proceedings of the 2018 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, Volume 1 (Long Papers)*, pages 2227–2237, New Orleans, Louisiana. Association for Computational Linguistics.

- [Polyak, 1964] Polyak, B. T. (1964). Some methods of speeding up the convergence of iteration methods. *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 4(5):1–17.
- [Radford et al., 2018] Radford, A., Narasimhan, K., Salimans, T., Sutskever, I., et al. (2018). Improving language understanding by generative pre-training.
- [Ramshaw and Marcus, 1999] Ramshaw, L. A. and Marcus, M. P. (1999). *Text Chunking Using Transformation-Based Learning*, pages 157–176. Springer Netherlands, Dordrecht.
- [Read, 2005] Read, J. (2005). Using emoticons to reduce dependency in machine learning techniques for sentiment classification. In *Proceedings of the ACL Student Research Workshop*, ACLstudent ’05, pages 43–48, Stroudsburg, PA, USA. Association for Computational Linguistics.
- [Salton et al., 1975] Salton, G., Wong, A., and Yang, C.-S. (1975). A vector space model for automatic indexing. *Communications of the ACM*, 18(11):613–620.
- [Severyn and Moschitti, 2015] Severyn, A. and Moschitti, A. (2015). Twitter sentiment analysis with deep convolutional neural networks. In *Proceedings of the 38th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*, pages 959–962, New York, NY, USA. ACM.
- [Srivastava et al., 2014] Srivastava, N., Hinton, G., Krizhevsky, A., Sutskever, I., and Salakhutdinov, R. (2014). Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting. *The journal of machine learning research*, 15(1):1929–1958.
- [Sutskever et al., 2013] Sutskever, I., Martens, J., Dahl, G., and Hinton, G. (2013). On the importance of initialization and momentum in deep learning. In *International conference on machine learning*, pages 1139–1147.
- [Tang et al., 2015] Tang, D., Qin, B., and Liu, T. (2015). Document modeling with gated recurrent neural network for sentiment classification. In *Proceedings of the 2015 conference on empirical methods in natural language processing*, pages 1422–1432.
- [Tang et al., 2014] Tang, D., Wei, F., Qin, B., Zhou, M., and Liu, T. (2014). Building large-scale twitter-specific sentiment lexicon : A representation learning approach. In *COLING 2014, 25th International Conference on Computational Linguistics, Proceedings of the Conference: Technical Papers, August 23-29, 2014, Dublin, Ireland*, pages 172–182.
- [Thoppilan et al., 2022] Thoppilan, R., De Freitas, D., Hall, J., Shazeer, N., Kulshreshtha, A., Cheng, H.-T., Jin, A., Bos, T., Baker, L., Du, Y., et al. (2022). Lamda: Language models for dialog applications. *arXiv preprint arXiv:2201.08239*.

- [Tibshirani, 1996] Tibshirani, R. (1996). Regression shrinkage and selection via the lasso. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 58(1):267–288.
- [Tieleman and Hinton, 2012] Tieleman, T. and Hinton, G. (2012). Lecture 6.5-rmsprop: Divide the gradient by a running average of its recent magnitude. *COURSERA: Neural networks for machine learning*, 4(2):26–31.
- [Turian et al., 2010] Turian, J., Ratinov, L., and Bengio, Y. (2010). Word representations: a simple and general method for semi-supervised learning. In *Proceedings of the 48th annual meeting of the association for computational linguistics*, pages 384–394. Association for Computational Linguistics.
- [Vaswani et al., 2017] Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, Ł., and Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. *Advances in neural information processing systems*, 30.
- [Wei et al., 2022] Wei, J., Wang, X., Schuurmans, D., Bosma, M., Chi, E., Le, Q., and Zhou, D. (2022). Chain of thought prompting elicits reasoning in large language models. *arXiv preprint arXiv:2201.11903*.
- [Yule, 2016] Yule, G. (2016). *The study of language*. Cambridge university press.
- [Zeiler, 2012] Zeiler, M. D. (2012). Adadelta: an adaptive learning rate method. *arXiv preprint arXiv:1212.5701*.
- [Zhao et al., 2023] Zhao, W. X., Zhou, K., Li, J., Tang, T., Wang, X., Hou, Y., Min, Y., Zhang, B., Zhang, J., Dong, Z., Du, Y., Yang, C., Chen, Y., Chen, Z., Jiang, J., Ren, R., Li, Y., Tang, X., Liu, Z., Liu, P., Nie, J.-Y., and Wen, J.-R. (2023). A survey of large language models.
- [Zipf, 1935] Zipf, G. K. (1935). *The Psychobiology of Language*. Houghton-Mifflin, New York, NY, USA.
- [Zou and Hastie, 2005] Zou, H. and Hastie, T. (2005). Regularization and variable selection via the elastic net. *Journal of the royal statistical society: series B (statistical methodology)*, 67(2):301–320.